



**Luís Miguel Castanheira**

Licenciado

# **Estudo da influência da luz natural na qualidade da iluminação e na eficiência energética**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão, FCT/UNL

Arguente: Prof. Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato, ISCTE



Setembro de 2012



**Luís Miguel Castanheira**

Licenciado

**Estudo da influência da luz natural na  
qualidade da iluminação e na eficiência  
energética**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão, FCT/UNL

Arguente: Prof. Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato, ISCTE



“Copyright” Luís Miguel Castanheira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

A toda a minha família, em especial aos meus pais e irmão. Por todo o apoio que me deram.

Ao meu Orientador, Professor Doutor Daniel Aelenei, por toda a disponibilidade e por ter aceite este desafio.

À Arquitecta Evelise Leite Didoné e ao Eng. Greici Ramos que mesmo estando no Brasil mostraram-se sempre disponíveis para me dar informações.

À Doutora Marie-Claude Dubois pela magnífica palestra e esclarecimentos.

À minha afilhada Catarina Boleto por me emprestar o portátil.

Aos meus amigos em especial à Ana Carla e à minha madrinha Carla Silva.



# Resumo

O uso da iluminação natural nas edificações visa satisfazer as necessidades humanas, funcionais e ambientais do espaço construído através da eficiência energética. Os projectistas devem poder estimar a qualidade de iluminação natural do ambiente interior em fase de projecto de modo a ser possível identificar e escolher as soluções adequadas.

Este trabalho tem como objectivo avaliar a qualidade da iluminação natural em compartimentos de edifícios de escritórios. A metodologia foi baseada na avaliação e comparação do desempenho luminoso e energético de modelos com diferentes variáveis, através da simulação computacional integrada com o uso das ferramentas *Daysim* e *EnergyPlus*.

Os resultados mostram que esta metodologia possibilita a identificação da qualidade da iluminação natural e o consumo associado à iluminação artificial necessária para completar a iluminância estipulada para o período de ocupação.

## Palavras chave:

Iluminação natural, simulação dinâmica, *EnergyPlus*, *Daysim*



# Abstract

The use of natural light in architecture aims to meet human, functional and environmental aspects of the built environment through energy efficiency. The designers must be able to estimate the quality of daylighting in order to be able to identify and choose the best solutions.

This study aimed to evaluate the quality of daylighting in office buildings. The used methodology, was based on the evaluation and comparison of luminous and energy performance of models with different variables, using computer simulations integrated with Daysim and EnergyPlus.

The results show that this methodology allows to identify the quality of natural and artificial light to the associated consumption required to complete the illuminance set point for the occupation period.

## Keywords:

Daylighting, dynamic simulation, *EnergyPlus*, *Daysim*



# Índice de Matérias

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Quadros</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de abreviaturas, siglas e símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	2
1.3 Objectivo e metodologia . . . . .	2
1.3.1 Objectivos específicos . . . . .	3
1.4 Estrutura da dissertação . . . . .	3
<b>2 Estado de conhecimento</b>	<b>5</b>
2.1 Iluminação do ambiente . . . . .	5
2.2 Conceitos e grandezas fotométricas . . . . .	6
2.2.1 Fluxo luminoso ( $\Phi$ ) . . . . .	7
2.2.2 Intensidade luminosa ( $I$ ) . . . . .	7
2.2.3 Iluminância ( $E$ ) . . . . .	8
2.2.4 Luminância ( $L$ ) . . . . .	9
2.2.5 Contraste ( $C$ ) . . . . .	10
2.3 Benefícios da luz natural . . . . .	10
2.3.1 Luz natural para o conforto e saúde . . . . .	11
2.3.2 Luz natural e eficiência energética . . . . .	11
2.4 Integração da luz natural . . . . .	12
2.4.1 Dispositivos de iluminação natural . . . . .	13
2.5 Integração de sistemas de iluminação artificial . . . . .	17
2.5.1 Iluminação artificial da tarefa e do ambiente . . . . .	18
2.5.2 Diferenciação das necessidades nocturnas e diurnas . . . . .	19
2.5.3 Controlo da iluminação artificial . . . . .	19
2.5.4 Utilizador . . . . .	19
2.6 Objectivos do projecto de iluminação natural . . . . .	20
2.6.1 Quantidade . . . . .	20

2.6.2	Qualidade . . . . .	20
2.6.3	Utilidade . . . . .	20
2.6.4	Integração . . . . .	21
2.6.5	Custo-benefício . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Iluminação natural, grandezas e métodos de cálculo</b>	<b>23</b>
3.1	Modelos de céu . . . . .	23
3.1.1	Modelo de céu Perez . . . . .	24
3.2	Grandezas e abordagem tradicional sobre a iluminação natural . . . . .	25
3.2.1	<i>Daylight Factor</i> (DF) . . . . .	25
3.3	Grandezas dinâmicas de iluminação natural . . . . .	26
3.3.1	<i>Daylight Autonomy</i> (DA) . . . . .	26
3.3.2	<i>Useful Daylight Illuminances</i> (UDI) . . . . .	27
3.3.3	<i>Daylight Autonomy maximum</i> (DAmax) . . . . .	28
3.3.4	Conclusões das grandezas dinâmicas de iluminação natural . . . . .	28
3.4	Parâmetros de avaliação do desempenho energético e visual . . . . .	28
3.4.1	Parâmetros de desempenho energético . . . . .	29
3.4.2	Parâmetros de desempenho visual e de conforto . . . . .	29
3.5	Ferramentas de simulação . . . . .	30
3.5.1	Ferramentas de simulação dinâmica . . . . .	30
3.5.2	Modelação tridimensional . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Metodologia e caso de estudo</b>	<b>37</b>
4.1	Localização e descrição do clima . . . . .	38
4.2	Construção dos modelos . . . . .	38
4.2.1	Características dos modelos . . . . .	38
4.2.2	Modelos para simulação . . . . .	43
4.3	Simulações computacionais . . . . .	48
4.3.1	Simulação da iluminação natural . . . . .	48
4.3.2	Simulação termo-energética . . . . .	49
4.3.3	Simulação energética integrada . . . . .	50
4.3.4	Arquivos climáticos . . . . .	50
4.4	Critérios de avaliação do desempenho energético e visual . . . . .	52
4.5	Processamento e análise dos dados . . . . .	53
4.5.1	Comportamento da luz natural . . . . .	53
4.5.2	Potencial de economia de energia eléctrica . . . . .	54
4.5.3	Avaliação do desempenho energético e visual . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Resultados e discussão</b>	<b>57</b>
5.1	Comportamento da luz natural . . . . .	57
5.1.1	Análise Modelo 1 . . . . .	58
5.1.2	Análise Modelo 2 . . . . .	65
5.1.3	Análise Modelo 3 . . . . .	71
5.1.4	Conclusões dos resultados do comportamento da luz natural . . . . .	78
5.2	Potencial de economia de energia eléctrica . . . . .	79
5.2.1	Modelo Base . . . . .	80
5.2.2	Modelo 1 . . . . .	81
5.2.3	Modelo 2 . . . . .	83

## ÍNDICE DE MATÉRIAS

5.2.4	Modelo 3 . . . . .	85
5.2.5	Conclusões dos resultados do potencial de economia de energia eléctrica . . . . .	86
5.3	Avaliação do desempenho energético e visual . . . . .	87
5.3.1	Modelo 1 . . . . .	88
5.3.2	Modelo 2 . . . . .	89
5.3.3	Modelo 3 . . . . .	90
5.3.4	Conclusões da avaliação do desempenho energético e visual . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Conclusões e considerações finais</b>	<b>93</b>
6.1	Conclusões . . . . .	93
6.1.1	Grandezas dinâmicas de iluminação natural . . . . .	94
6.1.2	Ferramenta de simulação dinâmica de iluminação natural - <i>Daysim</i> . . . . .	94
6.2	Considerações finais . . . . .	95
6.2.1	Limitações do trabalho . . . . .	95
6.2.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	95
	<b>Bibliografia</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Projecto luminotécnico</b>	<b>103</b>
A.1	Escolha de luminária . . . . .	103
A.2	Factor de manutenção . . . . .	104
A.3	Cálculo luminotécnico . . . . .	104
A.4	Distribuição das armaduras . . . . .	108
<b>B</b>	<b>Relatório do Daysim</b>	<b>109</b>
<b>C</b>	<b>Padrões de referência de utilização dos edifícios</b>	<b>111</b>
<b>D</b>	<b>Dimensionamento de sombreamentos</b>	<b>115</b>
D.1	Caracterização do local . . . . .	115
D.2	Período de sombreamento . . . . .	115
D.3	Princípios da Geometria Solar . . . . .	116
D.4	Dimensionamento dos elementos de sombreamento . . . . .	117
D.4.1	Dimensionamento das palas horizontais para a área de janela 30% . . . . .	119
D.4.2	Dimensionamento das palas horizontais para a área de janela 60% . . . . .	119
D.4.3	Dimensionamento das palas horizontais para a área de janela 90% . . . . .	120
D.5	Conclusões do dimensionamento de sombreamentos . . . . .	120
<b>E</b>	<b>Relação entre a percentagem de área e DA e o DAMax</b>	<b>121</b>
<b>F</b>	<b>Consumos de energia eléctrica</b>	<b>131</b>
<b>G</b>	<b>Redução de consumos entre os modelos paramétricos e o modelo base</b>	<b>135</b>



# Índice de Figuras

2.1	Variáveis da componente da luz em relação ao ambiente interior. . . . .	6
2.2	Esquema do fluxo luminoso de um lúmen emitido por fonte luminosa. . . . .	7
2.3	Representação do ângulo sólido. . . . .	7
2.4	Esquema do fluxo luminoso de 1 lúmen que incide sobre uma área de 1 metro quadrado e produz o uma iluminância de $1lx$ . . . . .	8
2.5	Esquema da intensidade luminosa reflectida por uma superfície dividida pela área visível aos olhos denominada luminância. . . . .	9
2.6	Influência da luz natural nos sistemas de aquecimento, arrefecimento e luz artificial. . . . .	12
2.7	Decréscimo do nível de iluminação com o aumento da distância à janela . . . . .	14
2.8	Distribuição da luz natural no interior de uma sala com aberturas zenitais . . . . .	14
2.9	Sistemas de sombreamento horizontais . . . . .	15
2.10	Sistemas de sombreamento vertical . . . . .	16
2.11	Comportamento térmico e óptico do vidro à energia solar incidente. . . . .	17
2.12	Sistemas de iluminação artificial . . . . .	18
3.1	Modelos de céu, CIE . . . . .	24
3.2	Proposta de organização do processo de simulação . . . . .	34
4.1	Metodologia . . . . .	37
4.2	Para a simulação térmica considera-se o escritório confinado por outros termicamente similares. . . . .	39
4.3	Representação dos materiais do Quadro 4.2. . . . .	40
4.4	Dimensões dos modelos estudados. . . . .	44
4.5	Modelos paramétricos, 108 casos diferentes. . . . .	45
4.6	Dimensões das janelas. . . . .	46
4.7	Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para Aj30, 60 e 90 no período optimizado 21/03 a 23/09. . . . .	47
4.8	Exemplo de grelha de pontos do plano de trabalho para o M2. . . . .	49
4.9	Configuração do E+ para receber o relatório “.csv” do <i>Daysim</i> . . . . .	50
4.10	Dados mensais no ficheiro climático de Lisboa . . . . .	51
4.11	Método gráfico para análise do comportamento da iluminação natural. . . . .	53
4.12	Método gráfico para análise do potencial de economia de energia eléctrica. . . . .	54
4.13	Método gráfico para avaliação do desempenho energético e visual. . . . .	55
5.1	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj30V1, nas quatro orientações principais. . . . .	58

5.2	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj30V2, nas quatro orientações principais. . . . .	58
5.3	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj30V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	59
5.4	Comparação da distribuição do DA e DAm <sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.1 a 5.3. . . . .	59
5.5	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj60V1, nas quatro orientações principais. . . . .	60
5.6	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj60V2, nas quatro orientações principais. . . . .	60
5.7	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	61
5.8	Comparação da distribuição do DA e DAm <sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.5 a 5.7. . . . .	61
5.9	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj90V1, nas quatro orientações principais. . . . .	62
5.10	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj90V2, nas quatro orientações principais. . . . .	62
5.11	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj90V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	63
5.12	Comparação da distribuição do DA e DAm <sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.9 a 5.11. . . . .	63
5.13	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj30V1, nas quatro orientações principais. . . . .	65
5.14	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj30V2, nas quatro orientações principais. . . . .	65
5.15	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj30V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	66
5.16	Comparação da distribuição do DA e DAm <sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.13 a 5.15. . . . .	66
5.17	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V1, nas quatro orientações principais. . . . .	67
5.18	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V2, nas quatro orientações principais. . . . .	67
5.19	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	67
5.20	Comparação da distribuição do DA e DAm <sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.17 a 5.19. . . . .	68
5.21	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj90V1, nas quatro orientações principais. . . . .	69
5.22	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj90V2, nas quatro orientações principais. . . . .	69
5.23	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	69
5.24	Comparação da distribuição do DA e DAm <sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.21 a 5.23. . . . .	70
5.25	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj30V1, nas quatro orientações principais. . . . .	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

5.26	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj30V2, nas quatro orientações principais. . . . .	72
5.27	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj30V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	73
5.28	Comparação da distribuição do DA e DAMax nas quatro orientações das Figuras 5.25 a 5.27. . . . .	73
5.29	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj60V1, nas quatro orientações principais. . . . .	74
5.30	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj60V2, nas quatro orientações principais. . . . .	74
5.31	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	75
5.32	Comparação da distribuição do DA e DAMax nas quatro orientações das Figuras 5.29 a 5.31. . . . .	75
5.33	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj90V1, nas quatro orientações principais. . . . .	76
5.34	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj90V2, nas quatro orientações principais. . . . .	76
5.35	Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj90V2Ph, nas quatro orientações principais. . . . .	77
5.36	Comparação da distribuição do DA e DAMax nas quatro orientações das Figuras 5.33 a 5.35. . . . .	77
5.37	Síntese dos modelos em relação à profundidade. . . . .	79
5.38	Consumo nominal total de energia eléctrica por orientação (N, S, E e O) para o MB (1, 2 e 3). . . . .	80
5.39	Consumo nominal de energia eléctrica separado por uso final para o MB (1, 2 e 3), nas quatro orientações principais. . . . .	81
5.40	Consumo total estimado de energia eléctrica por Aj (30%, 60% e 90%) para o M1 (V1, V2 e V2Ph), nas quatro orientações principais. . . . .	82
5.41	Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final do escritório M1 para Aj variável, nas quatro orientações principais. . . . .	82
5.42	Consumo total estimado de energia eléctrica por Aj (30%, 60% e 90%) para o M2 (V1, V2 e V2Ph), nas quatro orientações principais. . . . .	83
5.43	Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final do escritório M2 para Aj variável, nas quatro orientações principais. . . . .	84
5.44	Consumo total estimado de energia eléctrica por Aj (30%, 60% e 90%) para o M3 (V1, V2 e V2Ph), nas quatro orientações principais. . . . .	85
5.45	Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final do escritório M3 para Aj variável, nas quatro orientações principais. . . . .	86
5.46	Consumo estimado de energia eléctrica, separado por iluminação, ventilação, ar-condicionado e total relacionado com diferentes volumetrias. . . . .	87
5.47	Soluções para o uso de energia, desempenho visual e conforto do escritório M1 para Aj variável, nas quatro orientações principais. . . . .	88
5.48	Soluções para o uso de energia, desempenho visual e conforto do escritório M2 para Aj variável, nas quatro orientações principais. . . . .	89
5.49	Soluções para o uso de energia, desempenho visual e conforto do escritório M3 para Aj variável, nas quatro orientações principais. . . . .	90

A.1	Luminária Philips: TCS260 2x28W. . . . .	103
A.2	Abaco luminária Philips: TCS260 2x28W. . . . .	104
A.3	Distribuição das luminárias. . . . .	108
B.1	Exemplo de relatório do <i>Daysim</i> no caso M1Aj60V2PhS: Resumo. . . . .	109
B.2	Exemplo de relatório do <i>Daysim</i> no caso M1Aj60V2PhS: Pressupostos. . . . .	110
B.3	Exemplo de relatório do <i>Daysim</i> no caso M1Aj60V2PhS: Resultados detalhados. . . . .	110
C.1	Perfil de ocupação. . . . .	111
C.2	Perfil de iluminação. . . . .	112
C.3	Perfil de equipamentos. . . . .	113
D.1	Sombreamento horizontal simples baseado em dois momentos (manhã e tarde). . . . .	116
D.2	Diagrama solar dia 21 de Março às 10h. . . . .	117
D.3	Diagrama solar dia 21 de Março às 15h. . . . .	117
D.4	Diagrama solar dia 23 de Setembro às 10h. . . . .	117
D.5	Diagrama solar dia 23 de Setembro às 15h. . . . .	117
D.6	Dimensionamento de sombreamentos. . . . .	118
D.7	Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para $A_j30$ no dia 23/09 às 15h. . . . .	119
D.8	Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para $A_j60$ no dia 23/09 às 15h. . . . .	120
D.9	Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para $A_j90$ no dia 23/09 às 15h. . . . .	120

# Índice de Quadros

2.1	Comportamento térmico de alguns vidros. . . . .	16
3.1	Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica DF. . . . .	26
3.2	Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica DA. . . . .	27
3.3	Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica UDI. . . . .	27
3.4	Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica DAm <sub>ax</sub> . . . . .	28
3.5	Critérios utilizados para o conforto térmico, visual e avaliação de desempenho. . . . .	29
3.6	Programas de simulação dinâmica acreditados pela norma ANSI/ASHRAE 140-2004. . . . .	31
3.7	Programas de simulação computacional de iluminação natural dinâmica. . . . .	32
4.1	Localização do edifício, latitude, longitude, fuso horário e altitude. . . . .	38
4.2	Descrição das propriedades dos materiais. . . . .	40
4.3	Cores e coeficientes de reflexão ou reflectâncias recomendadas para as superfícies do local de trabalho. . . . .	40
4.4	Dias de projecto de inverno e de verão para a cidade de Lisboa. . . . .	41
4.5	Caudais mínimos de ar novo. . . . .	41
4.6	Perfis de utilização adoptados. . . . .	42
4.7	Valores das densidades. . . . .	42
4.8	Especificações técnicas do conjunto lâmpada-luminária utilizada no projecto luminotécnico. . . . .	42
4.9	Necessidades de iluminação para interiores, escritórios. . . . .	43
4.10	Propriedades dos vidros. . . . .	46
4.11	Características do Modelo base. . . . .	48
4.12	Dados de entrada para modelos do <i>Daysim</i> . . . . .	48
4.13	Resumo dos critérios aplicados. . . . .	52
A.1	Especificações técnicas do conjunto lâmpada-luminária utilizada no projeto luminotécnico. . . . .	103
A.2	Obtenção do factor de manutenção. . . . .	104
A.3	Cálculo de iluminação interna para o Modelo 1 . . . . .	105
A.4	Cálculo de iluminação interna para o Modelo 2 . . . . .	106
A.5	Cálculo de iluminação interna para o Modelo 3 . . . . .	107
C.1	Perfil de ocupação. . . . .	112
C.2	Perfil de iluminação. . . . .	112
C.3	Perfil de equipamentos. . . . .	113
D.1	Localização do edifício, latitude, longitude, fuso horário e altitude. . . . .	115

D.2	Valores das coordenadas solares. . . . .	116
D.3	Cálculo e optimização das palas horizontais, $A_j30$ . . . . .	119
D.4	Cálculo e optimização das palas horizontais, $A_j60$ . . . . .	119
D.5	Cálculo e optimização das palas horizontais, $A_j90$ . . . . .	120
E.1	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M1 para $A_j30\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	121
E.2	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M1 para $A_j60\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	122
E.3	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M1 para $A_j90\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	123
E.4	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M2 para $A_j30\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	124
E.5	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M2 para $A_j60\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	125
E.6	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M2 para $A_j90\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	126
E.7	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M3 para $A_j30\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	127
E.8	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M3 para $A_j60\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	128
E.9	Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M3 para $A_j90\%$ , nas quatro orientações principais. . . . .	129
F.1	Consumo estimado de energia eléctrica obtido com os escritórios MB1, MB2 e MB3, nas quatro orientações principais. . . . .	131
F.2	Consumo estimado de energia eléctrica obtido com o escritório M1 para $A_j$ variável, nas quatro orientações principais. . . . .	132
F.3	Consumo estimado de energia eléctrica obtido com o escritório M2 para $A_j$ variável, nas quatro orientações principais. . . . .	133
F.4	Consumo estimado de energia eléctrica obtido com o escritório M3 para $A_j$ variável, nas quatro orientações principais. . . . .	134
G.1	Redução de consumo entre M1 e o MB1 nas orientações N, S, E e O. . . . .	135
G.2	Redução de consumo entre M2 e o MB2 nas orientações N, S, E e O. . . . .	136
G.3	Redução de consumo entre M3 e o MB3 nas orientações N, S, E e O. . . . .	136

# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

## Abreviaturas

**A<sub>j</sub>** Relação entre a área de janela e a área da parede da envolvente exterior (%)

**CSV** *Comma separated value*

**DA** *Daylight Autonomy*

**DAm<sub>ax</sub>** *Daylight Autonomy maximum*

**DC** *Daylight Coefficient*

**DF** *Daylight Factor*

**E+** *EnergyPlus*

**EPW** *EnergyPlus Weather File*

$h_j$  Altura sombreamento total da área envidraçada

$h_{jopt}$  Altura sombreamento 2/3 da área envidraçada

**isoDA** *Iso Daylight Autonomy*

**M1** Modelo 1

**M2** Modelo 2

**M3** Modelo 3

**MB1** Modelo base 1

**MB2** Modelo base 2

**MB3** Modelo base 3

**V1** Vidro 1 (escuro)

**V2** Vidro 2 (claro)

**tn** Transmissividade

**Tn** Transmitância

### **Acrónimos**

**ASHRAE** *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning*

**AVAC** Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

**BLAST** *Basic Local Alignment Search Tool*

**BREEAM** *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*

**CEC-PIER** *California Energy Commission's Public Interest Energy Research*

**CERL** *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories*

**CIE** *Commission Internationale de l'Eclairage*

**CHPS** *Collaborative for High Performance Schools*

**DOE** *Department of Energy – USA*

**FCT** *Faculdade de Ciências e Tecnologia*

**IES** *Illuminating Engineering Society of North America's*

**IRAP** *Industrial Research Assistance Program*

**LBNL** *Lawrence Berkeley National Laboratory*

**LEED** *Leadership in Energy and Environmental Design*

**NRC** *National Research Council's*

**NYSERDA** *New York State Energy Research and Development Authority*

**NEEA** *Northwest Energy Efficiency Alliance*

**OSU** *Oklahoma State University*

*ÍNDICE DE QUADROS*

**RCCTE** Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios

**RSECE** Regulamento de Sistemas Energéticos e Climatização de Edifícios

**UE** União Europeia

**UNL** Universidade Nova de Lisboa

**UI** *University of Illinois*



# Capítulo 1

## Introdução

Neste primeiro capítulo apresenta-se a motivação que está na origem deste trabalho. O tema é enquadrado no contexto actual onde as preocupações ambientais e de conforto ocupam um lugar de destaque.

São apresentados os objectivos do trabalho e a estrutura no qual o mesmo está organizado.

### 1.1 Enquadramento

Actualmente com os constantes aumentos dos custos dos combustíveis e com os alertas acerca da poluição causada pelos mesmos, torna-se imperativa a poupança de energia. De modo global, a maior parte da energia empregada nas edificações provém de fontes não renováveis sendo que esta representa uma grande fatia do consumo energético dos edifícios na União Europeia. Segundo a estratégia da União Europeia para o Ambiente Urbano o aquecimento e a iluminação dos edifícios são responsáveis pela maior quota individual de utilização da energia, 42%, e produzem 35% de todas as emissões de gases com efeito de estufa, resultando daqui uma elevada taxa de emissão de  $CO_2$  para a atmosfera, responsável por importantes impactos ambientais (UE, 2004).

O desenvolvimento de uma consciência global para com as emissões de carbono, o aquecimento global e o desenvolvimento sustentado, têm contribuído para a aplicação de medidas e estratégias que visam a redução da facturação mensal energética dos edifícios e melhorando o conforto ambiental no seu interior. Uma das principais estratégias passa pelo aproveitamento da luz natural, mitigando a necessidade de iluminação artificial.

Por si só o uso da iluminação natural não resulta directamente em economia de energia, esta deriva, essencialmente de dois factores: (a) o uso de luz natural pode reduzir o uso de electricidade em iluminação artificial e (b) a luz natural tem uma eficácia luminosa superior à maioria dos sistemas eléctricos de iluminação. Assim, o recurso à iluminação natural gera menos calor por nível de iluminação fornecida, diminuindo a carga de refrigeração.

O processo de aproveitamento da iluminação natural, cujo objectivo principal consiste em proporcionar um ambiente visual interior adequado, constitui também, um dos principais factores condicionantes da qualidade ambiental das instalações. A população passa em média entre 80 e 90% do seu tempo dentro de edifícios, impreterivelmente é necessário criar condições visuais adequadas. Considera-se que o ambiente visual interior é adequado quando permite assegurar as necessidades de conforto visual e a execução das diferentes tarefas visuais. Mediante uma iluminação adequada as pessoas são capazes de executar mais e melhor as suas actividades podendo melhorar o seu estado de alerta, sono e bem-estar. Desta forma, as recomendações e normas de iluminação devem ser baseadas não só nas necessidades físicas, mas também nas necessidades biológicas do ser humano.

Deste modo, deverá ser uma preocupação fundamental a integração de estratégias e medidas mais adequadas de aproveitamento da luz natural. É neste âmbito que surge o presente trabalho, que se centra na análise do impacto da luz natural no desempenho térmico dos edifícios, e que deste modo pretende constituir um contributo válido para um projecto energeticamente mais eficiente. De seguida descrevem-se as motivações e os principais objectivos do trabalho.

## **1.2 Motivação**

O uso contínuo de energia é possivelmente o maior impacto ambiental característico de um edifício. Por isso um projecto energeticamente eficiente deve ser uma prioridade máxima na concepção de um edifício. Tal objectivo pode ser alcançado por diferentes meios, dentre eles, a utilização de fontes renováveis de energia, a minimização das cargas de arrefecimento e a optimização da luz natural.

Em Portugal, apesar de possuímos um clima luminoso bastante favorável a utilização da iluminação natural em edifícios feita de uma forma racional é muito parca, exceptuando casos muito pontuais. Os estudos da iluminação natural sempre foram considerados morosos e complexos, tornando-se, portanto, necessário desmistificar este preconceito e aprofundar conhecimentos nesta área assim como dominar ferramentas de simulação a fim de aferir qual o impacto do uso da iluminação natural no consumo energético das edificações.

## **1.3 Objectivo e metodologia**

O objectivo do presente trabalho prende-se com a aplicação de uma metodologia para modelar e avaliar o comportamento dinâmico da luz natural, assim como avaliar a eficiência energética considerando o aproveitamento da mesma para a redução do consumo energético das edificações. Mais que a obtenção de resultados específicos, procura-se através desta dissertação um processo de avaliação da qualidade da iluminação interior e do comportamento térmico do caso de estudo em análise, recorrendo a ferramentas de simulação.

## 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

### 1.3.1 Objectivos específicos

- Avaliar o potencial de economia de energia através do comportamento dinâmico da luz natural;
- Pesquisar as ferramentas de simulação de iluminação existentes, a fim de escolher o instrumento adequado para realizar as simulações;
- Avaliar a influência de diferentes geometrias, tamanhos de salas, orientações e tamanhos de aberturas na distribuição da luz natural;

## 1.4 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação está dividida em seis capítulos: o primeiro tem carácter introdutório, onde se apresenta o enquadramento do tema, expõe-se as motivações bem como o objetivo geral e os objetivos específicos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo corresponde ao estado de conhecimento necessário para o desenvolvimento da dissertação, esta inicia com a caracterização da iluminação do ambiente, conceitos e grandezas fotométricas, benefícios da luz natural, integração da luz natural e artificial.

O terceiro capítulo denominado iluminação natural: grandezas e métodos de cálculo, começa por referir os modelos de céu que estão na base de cálculo da iluminação, métodos e grandezas tradicionais contrapondo com as novas grandezas dinâmicas, parâmetros de avaliação do desempenho energético e visual e por fim aspectos da simulação computacional, remetendo para a escolha de ferramentas adequadas.

O quarto capítulo explica os procedimentos metodológicos utilizados, com o intuito de se alcançar os objetivos estabelecidos no primeiro capítulo.

O quinto capítulo aponta os resultados encontrados nas simulações e a discussão realizada a partir dos mesmos.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais junto com as limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# Estado de conhecimento

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica ao tema do trabalho. Pretende, de uma forma sintetizada, explicar as propriedades e as estratégias da iluminação natural, com o intuito de salientar a importância da sua incorporação.

Encontra-se dividido em seis partes. Referência-se a caracterização de iluminação do ambiente, conceitos e grandezas físicas, benefícios do aproveitamento da luz natural, o uso integrado da iluminação natural e artificial para a redução do consumo de energia.

### 2.1 Iluminação do ambiente

A forma mais eficiente de iluminar instalações com ocupação predominantemente diurnas é com o aproveitamento da luz natural, já que apresenta grandes vantagens frente a todas as outras formas de obtenção de luz: é não poluente, inesgotável e facilmente aproveitável. As únicas desvantagens apresentadas são a dependência dos factores climáticos e geográficos (constante solar, da latitude do local, do período sazonal, do albedo<sup>1</sup> da superfície terrestre e do clima). Neste sentido a caracterização da componente de iluminação do ambiente exterior é de grande importância para o conhecimento, compreensão e previsão dos fenómenos climáticos.

A iluminação no ambiente interno é resultado de várias reflexões da luz natural, sendo distinguidas três variáveis principais pelos quais a luz alcança um ponto no interior do espaço: a componente celeste, a componente de reflexão externa e a componente de reflexão interna (Figura 2.1).

A Componente Celeste (CC), provém da abóbada celeste e varia consoante a latitude, o dia e a hora, o tipo de céu e a orientação da fachada. A luz natural proveniente do sol, ao atravessar a atmosfera, em parte atravessa na forma de radiação solar directa (luz directa) e outra parte é difundida pelo vapor de água e outros elementos em suspensão no ar (luz difusa) (Vianna & Gonçalves, 2001).

---

<sup>1</sup>Albedo, quantidade de luz reflectida de uma maneira difusa por um corpo não luminoso e a quantidade de luz incidente.

A Componente de Reflexão Externa (CRE) resulta das reflexões provocadas pelo entorno da edificação na qual o ambiente está inserido. A reflexão da luz que chega ao ambiente é maior ou menor, de acordo com as características das superfícies desse entorno (tamanho, posição, cores e texturas). Para chegar ao ambiente interno, a luz ainda sofre influência de possíveis protecções solares existentes na edificação, como palas horizontais ou verticais, lamelas e outros elementos utilizados para controlo solar. De acordo com as características desses elementos, a luz directa pode ser barrada e permitir apenas a entrada da luz difusa com maior ou menor intensidade, conforme as superfícies dos elementos de protecção.

Por fim, para a luz penetrar no ambiente ela atravessa as aberturas, que podem variar de posição (aberturas laterais ou zenitais), orientação, dimensão, formato e podem permitir a entrada da luz por um vão aberto ou por elementos translúcidos ou transparentes, como vidros.

Após entrar no ambiente dá-se a Componente de Reflexão Interna (CRI), a luz distribui-se de acordo com as características do espaço, como profundidade, largura, cor e textura das superfícies, além dos objectos existentes que também têm influência na distribuição da iluminação. A reflexão provocada pela superfície do tecto é a mais significativa, uma vez que é a que mais influencia o plano de trabalho pela sua posição relativa a este.

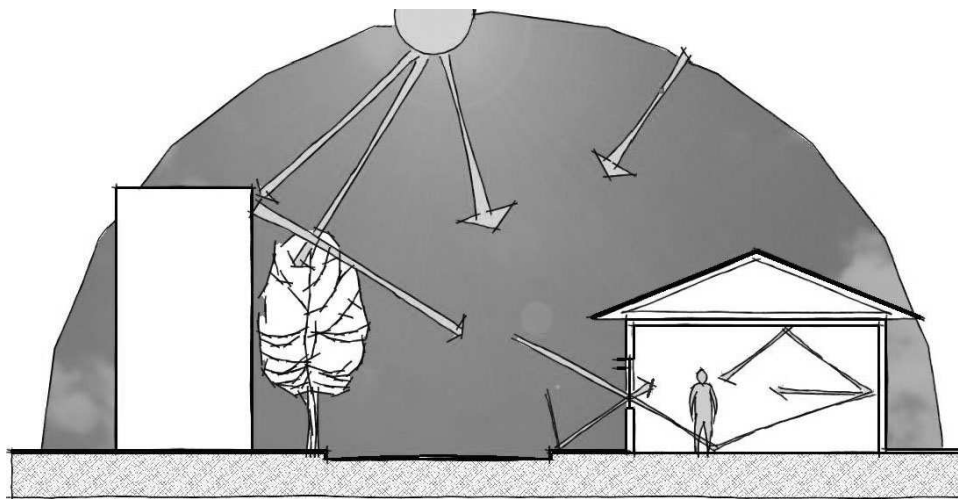


Figura 2.1: Variáveis da componente da luz em relação ao ambiente interior (Cintra, 2011).

## 2.2 Conceitos e grandezas fotométricas

Para melhor compreender o fenómeno da luz, é importante descrever alguns conceitos e definições, sobre as principais grandezas e unidades fotométricas da luz que permitem contabilizar e comparar os níveis de iluminação. A partir da consulta de autores como: Baker *et al.* (1993), Baker & Steemers (2002), Hopkinson *et al.* (1966), Vianna & Gonçalves (2001) são descritas algumas grandezas fotométricas: fluxo luminoso, intensidade luminosa, iluminância, luminância e contraste.

## 2.2. CONCEITOS E GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS

### 2.2.1 Fluxo luminoso ( $\Phi$ )

O fluxo luminoso é a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa, em todas as direcções, a qual produz estímulos visuais dentro dos limites do espectro visível ( $\approx 400$  a  $800$  nm) (Figura 2.2). O valor do fluxo luminoso permite saber a quantidade de luz emitida pela fonte num intervalo de tempo Equação 2.1. A unidade de fluxo luminoso é o lúmen ( $lm$ ).

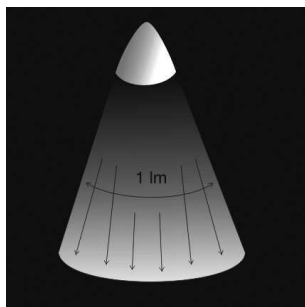


Figura 2.2: Esquema do fluxo luminoso de um lúmen emitido por fonte luminosa (Wikipédia, 2012a).

$$Q = \Phi * t \quad (2.1)$$

Onde:

$Q$  é a quantidade de luz ( $lm.s$ );

$\Phi$  é o fluxo luminoso ( $lm$ );

$t$  é o intervalo de tempo ( $s$ ).

### 2.2.2 Intensidade luminosa ( $I$ )

Para compreender a intensidade luminosa é necessário conhecer o conceito de ângulo sólido. Ângulo sólido pode ser definido como aquele que, visto do centro de uma esfera, percorre uma dada área sobre a superfície dessa esfera, como se pode ver na Figura 2.3. A Equação 2.2 expressa o conceito de ângulo sólido e a sua unidade é o esterradiano ( $sr$ ).

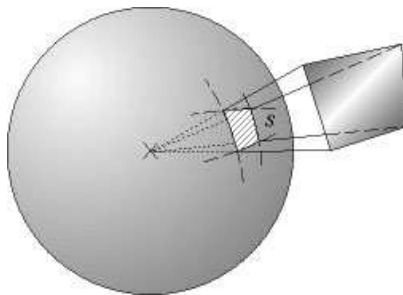


Figura 2.3: Representação do ângulo sólido (Wikipédia, 2011).

$$\omega = \frac{S}{r^2} \quad (2.2)$$

Onde:

$\omega$  é o ângulo sólido (*sr*);

$S$  é a área de superfície esférica ( $m^2$ );

$r$  é o raio da esfera ( $m$ ).

A intensidade luminosa é a quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa numa determinada direcção. Tal acontece porque uma fonte luminosa não irradia luz uniformemente em todas as direcções. Para se determinar o seu valor adopta-se um vector para uma dada direcção, e o seu comprimento indica uma determinada intensidade luminosa (Osram, 2000). A Equação 2.3 expressa a intensidade luminosa e a sua unidade é a candela (*cd*).

$$I = \frac{F}{\omega} \quad (2.3)$$

Onde:

$I$  é a intensidade luminosa (*cd*);

$\omega$  é o ângulo sólido (*sr*).

### 2.2.3 Iluminância ( $E$ )

A iluminância é a relação da quantidade de luz, emitida por uma fonte luminosa, com a superfície de incidência. Ou seja é a quantidade de luz dentro de um ambiente. Se o fluxo luminoso de 1 lúmen incidir numa superfície de 1 metro quadrado, a iluminação dessa área é de 1 lux (Figura 2.4). A Equação 2.4 expressa a grandeza iluminância e a sua unidade é o lux (*lx*), ou lúmen por metro quadrado ( $lm/m^2$ ).

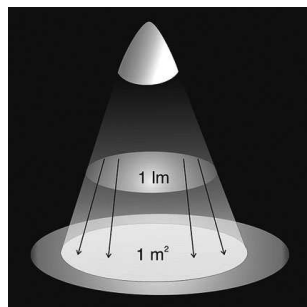


Figura 2.4: Esquema do fluxo luminoso de 1 lúmen que incide sobre uma área de 1 metro quadrado e produz uma iluminância de 1lx (Wikipédia, 2012b).

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (2.4)$$

## 2.2. CONCEITOS E GRANDEZAS FOTOMÉTRICAS

Onde:

$E$  é a iluminância ( $lx$ );

$\Phi$  é o fluxo luminoso ( $lm$ );

$A$  é a área projectada ( $m^2$ ).

Para obter conforto visual, considerando a actividade que se realiza, é necessário certos níveis de iluminância médios. Os mesmos são recomendados pela norma (EN-12464-1), apesar da norma ser direccionada para a iluminação artificial, esta é comumente utilizada como parâmetro também nas medições de iluminação natural, pois ainda não existe uma norma neste âmbito em Portugal.

### 2.2.4 Luminância ( $L$ )

A luminância consiste na quantidade de luz reflectida por uma determinada superfície. Assim, esta depende da quantidade de luz emitida pela fonte luminosa e da capacidade de reflexão do material. Logo, uma determinada iluminância gera diferentes luminâncias. A Equação 2.5 expressa a grandeza luminância e a sua unidade é a candela por metro quadrado ( $cd/m^2$ ).

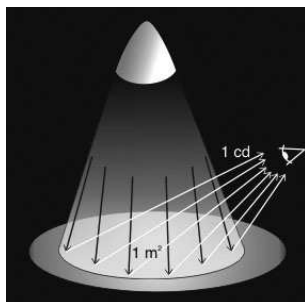


Figura 2.5: Esquema da intensidade luminosa reflectida por uma superfície dividida pela área visível aos olhos denominada luminância (Wikipédia, 2009).

$$L = \frac{I}{A * \cos \alpha} \quad (2.5)$$

Onde:

$L$  é a luminância ( $cd/m^2$ );

$I$  é a intensidade luminosa ( $cd$ );

$A$  é a área projectada ( $m^2$ );

$\alpha$  ângulo considerado *graus*.

Como é difícil medir a Intensidade Luminosa ( $I$ ) que provém de um corpo não radiante (através de reflexão), pode-se recorrer à Equação 2.6 (Osram, 2000):

$$L = \frac{\rho * E}{\pi} \quad (2.6)$$

Onde:

$L$  é a luminância ( $cd/m^2$ );

$\rho$  é a reflectância ou coeficiente de reflexão ( $cd$ );

$E$  é a iluminância ( $lx$ ).

### 2.2.5 Contraste ( $C$ )

O contraste é dado pela diferença relativa de luminâncias entre um determinado objecto e a sua envolvente.

$$C = \frac{(L_{objecto} * L_{fundo})}{L_{fundo}} \quad (2.7)$$

Onde:

$L$  é a luminância ( $cd/m^2$ ).

## 2.3 Benefícios da luz natural

O processo de aproveitamento da iluminação natural, cujo objectivo principal consiste em proporcionar um ambiente visual interior adequado, constitui também, um dos principais factores condicionantes da qualidade ambiental das instalações. Existem dois grandes benefícios decorrentes do aproveitamento da luz natural num espaço: psicológicos/fisiológicos e de eficiência energética.

- Psicologicamente e fisiologicamente a presença de luz natural tem demonstrado em vários estudos que melhora o bem estar e conforto dos ocupantes. Estes estudos demonstram que o aproveitamento da luz natural melhora a produtividade dos ocupantes, aprendizagem dos estudantes no caso de estabelecimento de ensino e as taxas de recuperação dos pacientes em edifícios hospitalares uma vez que a luz é um “marcador temporal” do relógio biológico e um estímulo que influencia o estado anímico do ser humano. Estes benefícios sozinhos justificam o esforço de introdução de luz natural no edifício. No entanto, a luz natural mal dimensionada pode negar alguns desses benefícios pelo excesso de brilho da radiação solar directa ou ganhos solares, causando desconforto visual e térmico.
- Do ponto de vista de eficiência energética, a iluminação natural pode reduzir o consumo de energia eléctrica referente à iluminação, que por sua vez, reduz as cargas de climatização. Com um sistema de protecção e controlo solar adequado, os ganhos solares durante o período de arrefecimento podem ser mitigados e durante a período de aquecimento podem ser benéficos, reduzindo tanto o arrefecimento como o aquecimento dos espaços.

## 2.3. BENEFÍCIOS DA LUZ NATURAL

### 2.3.1 Luz natural para o conforto e saúde

A influência da iluminação natural nas funções fisiológicas dos seres humanos acontece de duas formas: a exposição aos raios UV da radiação solar, que influencia o funcionamento do sistema nervoso, a absorção de vitamina D e a defesa imunológica, e a intensidade da exposição à iluminação natural, que influencia o ciclo ou ritmo circadiano. O ritmo circadiano é um ritmo diário que ajuda o ser humano acordar, a dormir, a estar alerta e relaxado. Uma vez interrompido, a dessincronização dos ritmos biológicos podem contribuir para várias doenças, como Transtorno Afectivo Sazonal (TAS), privação de sono e falta de energia e motivação (Corporation, 2006).

Estudos revelam o contributo que a descoberta das células fotoreceptoras no olho, têm na compreensão dos benefícios de uma iluminação adequada no trabalho, tendo em conta os efeitos visuais e os efeitos biológicos (saúde, bem-estar, estado de alerta) (van Bommel, 2006). Assim, de forma a manter a estabilidade destes efeitos, é necessário projectar sistemas de iluminação natural, artificial ou híbrida que mantenha a quantidade suficiente de iluminação nos locais de trabalho, não descuidando a sua qualidade, de forma a manter os ocupantes num estado de alerta activo, promover a saúde, o bem estar e o desempenho.

### 2.3.2 Luz natural e eficiência energética

A crescente preocupação e regulamentação ambiental, aliadas à crescente importância e pressão da opinião pública, colocam a questão do desempenho energético e ambiental na agenda da construção dos edifícios e na sua relação com o espaço envolvente (Pinheiro, 2006). Desta forma, o aspecto da integração entre luz natural e artificial passou a assumir uma importância cada vez maior.

No início da década de 70, com o choque da primeira grande crise de energia, surgem as primeiras preocupações com os consumos que se estavam a verificar na iluminação artificial (Editora, 2003-2012), sobretudo nos edifícios de serviço, aqui o consumo com a iluminação chega a ser responsável por 50% da energia total. Perante este facto torna-se essencial o uso da luz natural para reduzir o consumo de energia eléctrica quando explorada de forma integrada com os sistemas de iluminação artificial. Por si só o uso da iluminação natural não resulta directamente em economia de energia, esta só ocorre quando a carga de iluminação artificial e refrigeração podem ser reduzidas através da sua utilização.

Em Portugal a situação no que se refere à utilização da iluminação natural em edifícios feita de uma forma racional é praticamente inexistente, excetuando casos muito pontuais. Neste momento, verifica-se em determinados casos, a existência de espaços interiores que possuem condições de iluminação natural aceitáveis, como os edifícios escolares, no entanto estes são muito mais o resultado de um certo empirismo que o fruto de um estudo e projecto devidamente elaborado (Coelho, 1989).

No que concerne à legislação portuguesa que de alguma maneira determina o modo como os projectistas garantem o aproveitamento da luz natural e fazem uso do potencial energético que a luz solar oferece é quase ausente. Assim torna-se difícil compreender a falta de realização em regulamentação específica de objectivos quantificados para a limitação de potência eléctrica instalada por unidade de área dos espaços dos edifícios. Dessa forma, o conforto visual dos ocupantes dos imóveis e a diminuição das necessidades

de consumo energético em iluminação artificial não estão activos de uma forma satisfatória na legislação da construção de edifícios em Portugal.

A integração da luz natural com a iluminação artificial pode chegar facilmente a reduzir o consumo energético em cerca de 30% a 50%, e em alguns casos pode alcançar a ordem dos 60% a 70% (Arquitectos, 2001). Estas percentagens são demasiado significativas para serem descuradas o que leva a concluir que a iluminação natural deve ser pensada juntamente com a artificial para que se possa propor uma solução integrada. Sempre que a luz natural for adequada às necessidades de iluminação do ambiente, a iluminação artificial deve ser desativada ou reduzida (Figura 2.6).

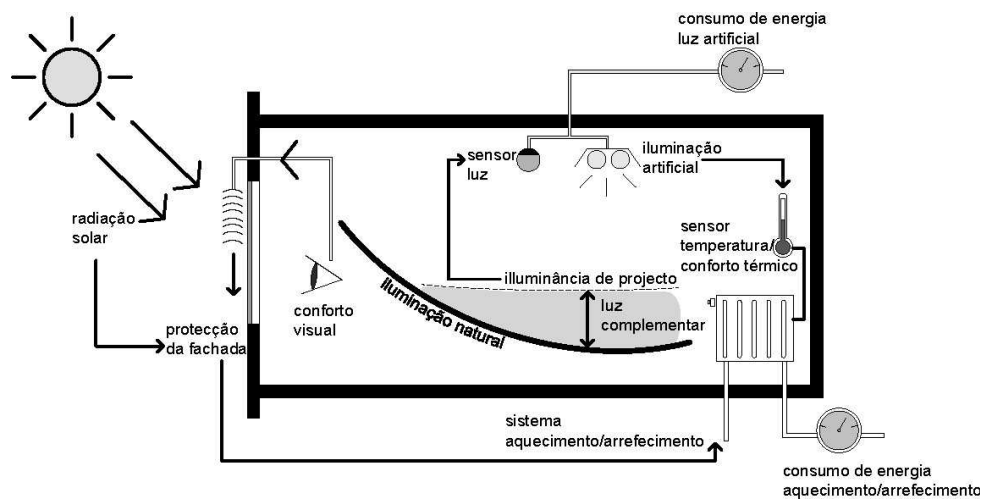


Figura 2.6: Influência da luz natural nos sistemas de aquecimento, arrefecimento e luz artificial (Adaptado de Ochoa *et al.*, 2012).

## 2.4 Integração da luz natural

Os projectos mais eficientes de luz natural são aqueles que são integrados e pensados com a restante arquitectura do edifício. Dispositivos de iluminação natural e controlo solar que são abordados tardiamente ou tidos em conta em edifícios já existentes tendem a ser mais caros de implementar e em geral mais problemáticos. Assim, problemas de controlo de iluminação natural e energia solar são idealmente considerados no início do projecto e abordados na programação dos vários espaços. Podendo-se considerar os seguintes problemas de integração:

- Iluminação natural adequada - Para cada espaço de um edifício tem que se considerar se é apropriada a introdução de luz natural. Espaços com necessidades muito específicas e inflexíveis onde valores muito altos de luz são problemáticos, devem ser considerados como prioridade baixa. Espaços que raramente são utilizados ou utilizados por curtos períodos de tempo, como salas de armazenamento, casas de banho e salas de reprografia, também devem ser uma prioridade de iluminação baixa, idealmente devem estar localizados no núcleo do edifício onde o acesso à iluminação natural é limitado. Espaços que estão continuamente ocupados e onde a iluminação natural e a vista para o exterior beneficiam as tarefas a desempenhar e a eficiência energética do

## 2.4. INTEGRAÇÃO DA LUZ NATURAL

edifício, devem ter uma prioridade de iluminação natural alta. Estes locais devem-se localizar ao longo do perímetro do edifício onde os recursos de luz são mais abundantes (Corporation, 2006);

- Influência da luz solar directa - Para cada espaço com prioridade alta de acesso à iluminação natural é necessário considerar a influência da luz solar directa relativamente ao brilho e ganhos de calor. Os espaços públicos, comuns e de transição tornam-se mais agradáveis com acréscimo de brilho e calor, especialmente nos meses de inverno ou nas manhãs mais frias. Estes espaços são localizados estrategicamente nas fachadas orientadas a Sul, Este e Oeste. Controlar os ganhos solares é sempre importante: projectistas devem controlar a entrada de luz solar directa, sombreando os ângulos solares altos de verão mas permitindo a entrada dos raios solares de inverno (Corporation, 2006). Em espaços onde o controlo de luz solar directa é crítico, é importante considerar estratégias de controlo logo no início do desenvolvimento do projecto de modo a evitar o recurso a métodos mais caros e menos integrados com o resto do desenho, à posteriori;
- Contacto visual e conexão com o exterior - Mesmo quando o recurso à luz natural não é suficiente para fornecer os requisitos de iluminação do espaço, a vista para o exterior fornece sempre o maior dos benefícios psicológicos da iluminação natural;
- Arquitectura integrada - Ao considerar a introdução de luz natural no edifício, tem de se pensar sempre em estratégias sinérgicas: formas de usar elementos de construção, arquitectura, mecânica e estrutural, para servir duas funções funcionalidade e iluminação (Corporation, 2006).

### 2.4.1 Dispositivos de iluminação natural

Um projecto de iluminação natural envolve o aproveitamento de todos os componentes internos e externos a uma edificação que podem ser beneficiados e até essenciais para o uso da luz natural. A importância de um bom projecto de iluminação natural faz-se sentir a dois níveis: por um lado no que respeita a proporcionar luz suficiente para uma tarefa visual eficaz assegurando um ambiente luminoso confortável e por outro lado de um ponto de vista económico.

#### Aberturas laterais

A função de uma abertura num ambiente pode ser dividida em quatro grupos: ganhos térmicos, visualização do ambiente externo, ventilação e iluminação natural. As janelas são um óptimo ponto de partida para a conservação da energia eléctrica com o uso da luz natural. Usadas correctamente em simbiose com dispositivos de controlo automáticos, podem minimizar os ganhos solares não desejados no verão e as perdas de calor no inverno, sem perda de iluminação natural.

As janelas tiveram desde sempre uma grande importância na Arquitectura, estas podem ser pequenas, altas, horizontais, ou completos panos de vidro mas independentemente da sua geometria a sua função é a de proporcionar aos ocupantes o contacto visual com o exterior e permitir que a luz penetre no interior de um edifício em tal quantidade e com tal distribuição que resulte numa iluminação satisfatória. Embora a janela permita a entrada da luz do dia, não é exclusivamente dela que dependem a quantidade e a qualidade da iluminação interior. É uma função da posição, forma e tamanho, mas também das propriedades reflectoras das superfícies interiores (Hopkinson *et al.*, 1966).

Numa divisão o tecto é a melhor superfície para refletir a luz, contribuindo até 80% para a iluminação desta. As paredes contribuem 50% e o chão apenas 20% (Egan & Olgay, 2002).

A iluminação natural lateral é a estratégia mais utilizada para obtenção de iluminação no interior dos ambientes. A principal desvantagem é ter uma distribuição desuniforme. Ou seja, a sua distribuição dentro do ambiente é muito variável, obtendo iluminâncias excessivas nas proximidades às aberturas e insuficientes em pontos mais afastados. Esta irregularidade é especialmente notável em ambientes muito profundos, portanto, as áreas sombrias devem ser completadas com outras formas de iluminação natural ou com iluminação artificial (Figura 2.7).

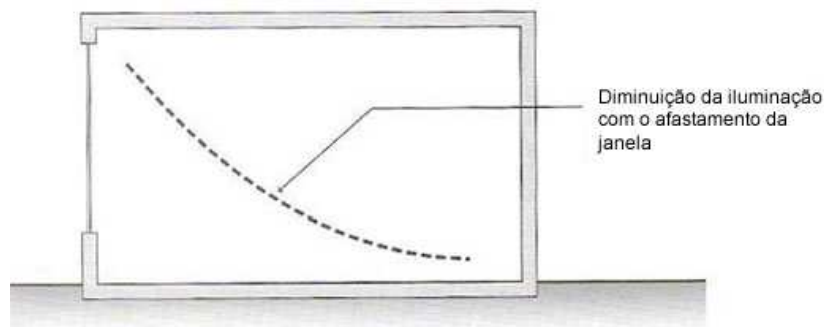


Figura 2.7: Decréscimo do nível de iluminação com o aumento da distância à janela (Adaptado de Egan & Olgay, 2002).

### Aberturas zenitais

A iluminação zenital consiste em iluminar um espaço através de aberturas localizadas na cobertura. Estas aberturas têm como principal característica uma maior uniformidade de distribuição da luz no espaço interior, em comparação com a iluminação lateral, já que se encontram distribuídas uniformemente pela área de cobertura (Figura 2.8). Além de maior uniformidade consegue obter um maior nível de iluminância, porque está exposta mais tempo à iluminação natural.

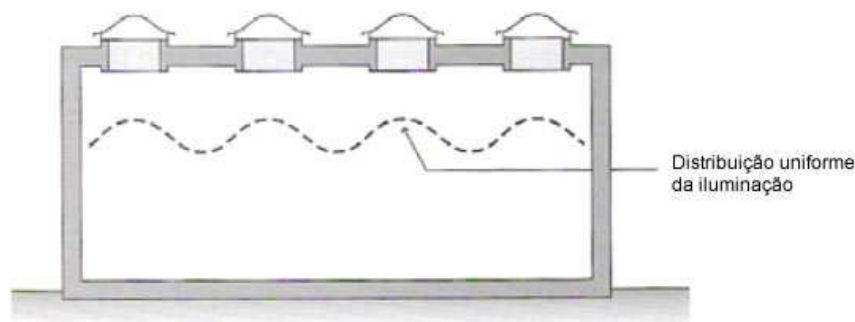


Figura 2.8: Distribuição da luz natural no interior de uma sala com aberturas zenitais (Adaptado de Egan & Olgay, 2002).

Este sistema de iluminação é muito usado em espaços de grandes dimensões, edifícios normalmente destinados a funções laborais, que exigem boa uniformidade e quantidades de luz. A distribuição da luz

## 2.4. INTEGRAÇÃO DA LUZ NATURAL

no interior de um local com iluminação zenital depende fundamentalmente de três factores: da forma das aberturas zenitais dos materiais e da altura entre o plano de trabalho e o elemento zenital (Didoné, 2009). Contrariamente às aberturas laterais em que o tecto tinha maior peso na redistribuição da luz aqui os elementos verticais, como as paredes, assumem essa função, para tal devem ter propriedades reflectoras elevadas.

A vantagem das aberturas zenitais é a variedade da localização que podem assumir, independentemente da orientação e da envolvente do edifício. Várias aberturas pequenas são mais eficazes que apenas uma abertura grande, no que diz respeito à qualidade da luz. A utilização de tectos altos e inclinados melhora notavelmente a distribuição da luz.

Combinando janela com abertura zenital e devidos dispositivos de sombreamento tem-se uma maior quantidade e qualidade de luz natural no espaço. As vantagens são inúmeras: reduzem as temperaturas internas devido à diminuição da carga térmica, além disso, podem reduzir custos de energia com a luz artificial. É sempre necessário controlar a quantidade de entrada de iluminação natural e evitar o excesso de luz e calor, sombrear as aberturas zenitais torna-se, portanto, uma solução imprescindível.

### Protecção solar

As protecções solares devem garantir que os raios solares passem pelas aberturas transparentes apenas nos períodos necessários, quando bem projectadas. Deve-se sempre pensar na sua influência sobre a luz natural e na visibilidade para o exterior. Existem vários tipos de sistemas de protecção solar, de diferentes formas, tamanhos e materiais, fixos ou móveis, manuais ou automáticos, externos ou internos ou inclusos e que podem ser orientados na horizontal ou na vertical. As suas características dependem directamente do clima, do uso da edificação e da origem da luz a ser excluída.

Os dispositivos sombreadores junto à abertura reduzem o encandeamento e os ganhos de calor durante o dia, bem como as perdas térmicas durante a noite (Arquitectos, 2001). A luz natural ao passar pelos elementos de sombreamento é admitida no interior em menor quantidade e sofre alterações na sua distribuição espacial, em função das características geométricas e da refletância dos mesmos.

Em relação à eficiência das protecções o uso do sombreamento horizontal externo é mais eficaz na fachada Sul, uma vez que consegue bloquear os raios solares de maior altitude e permite receber os raios de baixa altitude. Este sistema é bom porque reduz o excesso de luz e calor no verão, permitindo receber os raios de luz de baixa altitude do Inverno (Figura 2.9).

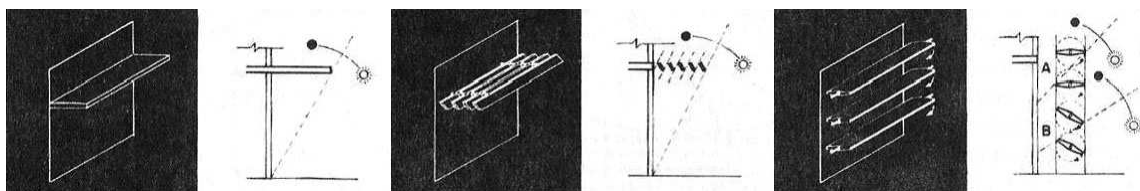


Figura 2.9: Sistemas de sombreamento horizontais (Olgyay & Olgyay, 1963).

Devido à grande profundidade de alcance dos raios de baixa altitude estes são mais difíceis de serem excluídos. Por essa razão nas fachadas Este e Oeste a orientação mais eficaz é a vertical, pois consegue

sombrear a luz ao nascer e ao pôr-do-sol (Didoné, 2009). A desvantagem é apenas em termos estéticos, podendo bloquear grande parte da vista para o exterior (Figura 2.10).

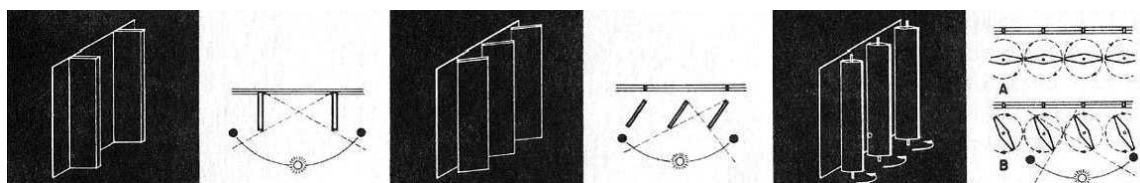


Figura 2.10: Sistemas de sombreamento verticais (Olgay & Olgay, 1963).

Em qualquer situação a melhor opção de protecção contra o sol directo é o uso de sombreamentos ajustáveis, sejam eles horizontais ou verticais, já que exercem a função de bloquear os raios solares e proporcionam maior visibilidade para o exterior.

Integradas num bom projecto as proteções solares são um investimento económico, no entanto a sua eficiência deve ser sempre verificada de modo a não comprometer o conforto e sustentabilidade do edifício.

## Vidros

O vidro, material transparente às radiações visíveis, tem funções específicas no edifício: permitir a iluminação natural do espaço interior e estabelecer uma conexão visual com o exterior. Em relação a outros materiais de construção, o vidro tem uma resistência muito baixa ao fluxo térmico, ou seja, é bom condutor de calor.

Aspectos como a luminosidade natural, a transparência/translucidez e a amplitude visual são as grandes potencialidades do vidro como material de construção com capacidade para controlar de forma racional a radiação solar (luz e calor) (Cruz & Pequeno, 2005). Existem vidros dos mais diferentes tipos, subdivididos em categorias e as mais avançadas tecnologias, que possuem capacidades distintas em absorver ( $\alpha$ ), refletir ( $\rho$ ) ou transmitir ( $\sigma$ ) radiação solar. Para satisfazer a lei da conservação de energia, a soma da transmissividade, reflectividade e absortividade têm de ser igual a 1, ou 100% da energia que incide sobre o material ( $\sigma + \alpha + \rho = 1$ ) (Figura 2.11). No Quadro 2.1 estão alguns exemplos de vidro catalogados por Albistur & Aroztegui (1985).

Quadro 2.1: Comportamento térmico de alguns vidros (Adaptado de Albistur & Aroztegui, 1985).

Tipo de vidro	Transmissividade $\sigma$	Absortividade $\alpha$	Reflectividade $\rho$
Comum	0,85	0,07	0,08
Absorvente claro	0,52	0,41	0,07
Absorvente médio	0,31	0,63	0,06
Absorvente escuro	0,09	0,86	0,05
Reflector médio	0,25	0,42	0,33
Reflector escuro	0,11	0,42	0,33

## 2.5. INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

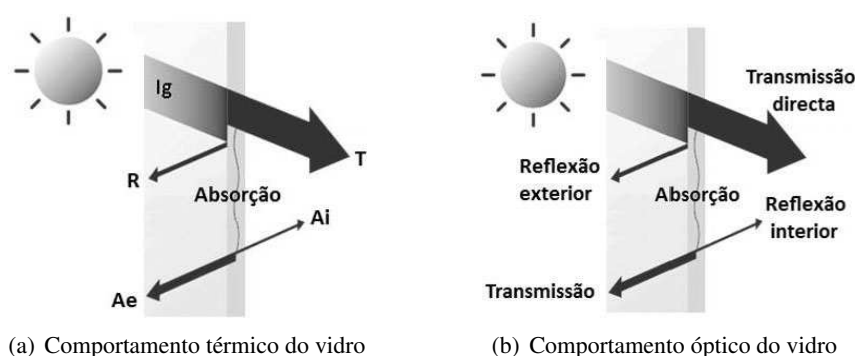


Figura 2.11: Comportamento térmico e óptico do vidro à energia solar incidente (Adaptado de Carmody, 2007). Onde:  $I_g$  – Energia solar global incidente (radiação directa + difusa);  $T$  – Transmissão energética global;  $R$  – Reflexão energética global;  $A_e$  - Fração da energia absorvida reenviada para o exterior;  $A_i$  – Fração da energia absorvida reenviada para o interior.

## 2.5 Integração de sistemas de iluminação artificial

A análise do sistema de iluminação artificial segue um processo similar àquele usado na análise do sistema de iluminação natural, considerando a função do espaço e os níveis de iluminação recomendados, tendo em conta o desempenho visual médio necessário à realização das tarefas (EN12464-1, 2002). A grande preocupação de um sistema de iluminação não é somente iluminar, mas iluminar bem quantitativamente e qualitativamente, com poucos gastos energéticos.

Os principais componentes de um sistema de iluminação artificial que influenciam a eficiência energética do sistema de iluminação, são as fontes de luz, luminárias, e balastros. As fontes de luz, neste caso as lâmpadas, são os únicos componentes do sistema de iluminação que podem converter energia eléctrica em luz visível. As lâmpadas podem ser agrupadas nas seguintes categorias: Lâmpadas incandescentes; Lâmpadas de descarga; Lâmpadas de indução; Led's.

Porém, para que as lâmpadas possam produzir luz eficientemente distribuída torna-se necessário a utilização de balastros (dependendo da lâmpada utilizada) e de luminárias. Os balastros são acessórios necessários à operação das lâmpadas de descarga, sendo a sua principal função limitar a corrente de funcionamento, produzir uma tensão adequada de arranque e pré-aquecer os eléctrodos de modo a facilitar a emissão de electrões para iniciar a descarga. Trata-se de um componente do sistema de iluminação, decisivo para a eficiência do sistema, de tal forma que uma das medidas tomadas pela UE, em virtude do protocolo de Quioto, foi a proibição de balastros de baixa eficiência energética em sistemas de iluminação (DLn°327, 2001).

As luminárias servem para direccionar e distribuir a luz para a zona desejada. Nestas estão alojadas as lâmpadas e balastro e possui uma zona onde está localizado um reflector, o qual deverá maximizar a reflexão da luz produzida pela lâmpada. A sua escolha é feita de acordo com as necessidades de iluminação do local e poderá contribuir para a eleição de lâmpadas com menor potência.

As seguintes estratégias de iluminação artificial devem ser consideradas tanto para espaços com acesso à luz natural como sem luz natural. Estas irão ajudar a diminuir a potência instalada, reduzindo o consumo de energia mantendo os níveis de luz necessários.

### 2.5.1 Iluminação artificial da tarefa e do ambiente

Em todos os locais de trabalho deve haver iluminação adequada, natural ou artificial, geral ou suplementar, apropriada à natureza da actividade. Uma estratégia utilizada na integração da iluminação natural num projecto é a distinção entre iluminação de tarefa e iluminação de ambiente. Um sistema de iluminação artificial de tarefa/ambiente, utiliza dois níveis de iluminação de modo a fornecer os requisitos de iluminância do espaço: (a) proporcionando um ambiente com nível de iluminação adequado para a circulação e as tarefas gerais e (b) fornecendo maior iluminação localizada nas tarefas específicas. Tipicamente, a iluminação ambiente é fornecida de uma forma mais difusa e uniforme. Esta sempre que possível deve ser projectada de forma indirecta, pois proporciona um ambiente mais confortável, atmosfera sem sombras e muitas vezes pode integrar-se melhor com a iluminação natural. No entanto, é preciso ter em conta a eficiência das luminárias e reflectância do tecto quando se utiliza sistemas indirectos pois tendem a ter um rendimento mais baixo do que um sistema de luminária directa. Ao nível da iluminação da tarefa deve ser fornecida de forma mais localizada apenas onde é necessário, ou seja, na secretária, junto ao computador, etc (Figura 2.12).

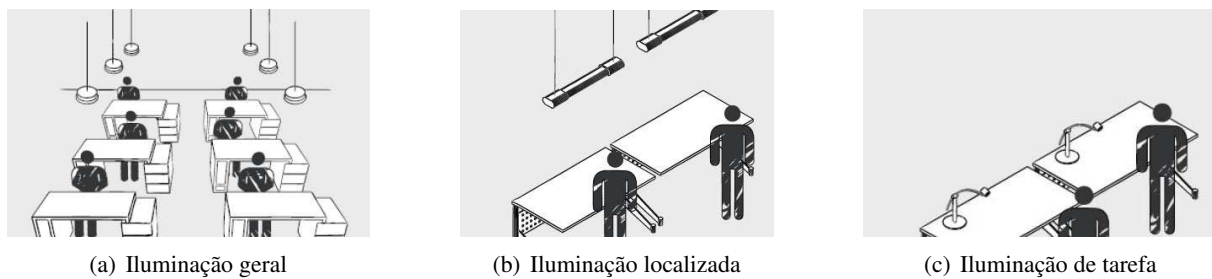


Figura 2.12: Sistemas de iluminação artificial (Osram, 2000).

Como a iluminação natural é um método eficaz para satisfazer as necessidades ambientais do espaço mas não é tão eficiente a manter os níveis mínimos de iluminação localizada, uma abordagem como iluminação de tarefa/ambiente integra melhor com a luz natural disponível. A intenção é ter a iluminação natural a prover o espaço de iluminação ambiente e controlar o nível de iluminação ambiente artificial em resposta às flutuações da mesma. Em muitos casos, sempre que houver luz do dia adequada a iluminação natural pode ser utilizada para fornecer iluminação ambiente e a iluminação artificial pode ser controlada com um simples interruptor horário, ou sensor de luz natural com regulação de fluxo.

A qualidade da iluminação dos postos de trabalho não é definida apenas pelo nível de iluminação. Deve-se ter em conta a distribuição da densidade luminosa, o ofuscamento, a direcção da luz e da sombra, a cor da luz e reprodução das cores.

Sempre que possível deve-se procurar uma iluminação uniforme, pois o olho humano não consegue adaptar-se a dois níveis de luminância muito diferentes em simultâneo. Estudos feitos no campo do desempenho visual sugerem que a situação ideal seria uma luminância do plano de fundo semelhante à luminância da tarefa. Como esta condição raramente é garantida, um rácio de luminância entre a tarefa e o plano de fundo imediato de 3 : 1 é aceitável no alcance do conforto visual. No entanto, entre a tarefa e o plano de fundo mais remoto admite-se um rácio de luminância até 10 : 1 e entre dois pontos do mesmo plano um rácio de luminância máximo de 40 : 1 (Baker *et al.*, 1993).

A abordagem de iluminação artificial de tarefa/ambiente, para além de proporcionar melhor integração

## 2.5. INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

com a iluminação natural, muitas das vezes resulta em baixas densidades de energia de iluminação, diminuindo o consumo, porque a iluminação só é fornecida quando e onde é necessária.

### 2.5.2 Diferenciação das necessidades nocturnas e diurnas

Os seres humanos evoluíram sobre níveis mais altos de iluminação durante o dia e níveis relativamente baixos de iluminação nocturna. Por isso, psicologicamente o ser humano está acostumado a esta condição sentindo-se mais confortável com níveis mais baixos de luz nos períodos nocturnos.

Os projectos luminotécnicos devem tirar proveito dessas necessidades rítmicas, especialmente quando a iluminação natural está integrada no projecto de iluminação. Em espaços com níveis de saturação de luz adequada, a iluminação eléctrica pode ser projectada para as exigências mais baixas, já que durante o dia apenas complementa a luz natural. Resultando em baixas densidades de energia de iluminação, bem como um melhor ritmo psicológico para o ambiente luminoso.

### 2.5.3 Controlo da iluminação artificial

As necessidades de evitar os desperdícios de energia eléctrica, seja mantendo lâmpadas acesas em ambientes desocupados ou em ambientes onde a luz natural supre as necessidades durante alguns períodos ou durante todo o dia, tornou necessária a evolução e o aperfeiçoamento de alguns mecanismos de controlo. O controlo da iluminação artificial é feito através de equipamentos que ligam, desligam e controlam o nível de iluminância dos ambientes reduzindo assim o consumo energético em iluminação. Os equipamentos utilizados para este controlo são interruptores manuais, interruptor horário, o interruptor crepuscular e o sensor de luz natural com regulação de fluxo.

A iluminação deve ser utilizada apenas em níveis suficientes para as actividades desenvolvidas nos espaços em questão e apenas quando é necessária. A utilização de sistemas de controlo da iluminação é essencial para a real contribuição da luz natural, nomeadamente sensores de luz natural com regulação de fluxo. Deste modo as fontes de luz apenas consomem a energia necessária para que emitam o fluxo luminoso suficiente para manter o nível de iluminação desejado. Assim a poupança energética não depende apenas do número de horas que a iluminação está desligada, mas também da poupança energética que se consegue relativamente a uma situação em que as lâmpadas funcionem sempre à potência máxima (Fernandes, 2008).

A ANSI/ASHRAE-140 (2004) recomenda, em escritórios *open space*, que os sensores sejam controlados de forma automática e em escritórios privados, a utilização dos fotossensores e do interruptor, pré-ajustados em automático e manual.

### 2.5.4 Utilizador

As estratégias de projecto para assegurar a conservação de energia depende das condições climáticas, localização e forma do edifício, mas também do tipo, função e padrão de uso. Edifícios de escritórios,

escolas e lojas são principalmente usadas durante o dia, as residências podem tanto ser ocupadas constantemente ou de forma intermitente, enquanto hospitais, aeroportos e alguns edifícios indústrias podem ser de uso constante.

O comportamento dos ocupantes tem um efeito significativo sobre o consumo energético de uma edificação. Uma edificação que foi projectada para ser energeticamente eficiente pode falhar no seu objectivo se os ocupantes tiverem um comportamento de desperdício energético. Por sua vez, um comportamento energético consciente pode conseguir economizar.

## **2.6 Objectivos do projecto de iluminação natural**

A abordagem durante a concepção de um projecto de iluminação natural deve desenvolver e avaliar as alternativas do mesmo contra as metas de desempenho definidas para a iluminação natural. Seguidamente são apresentadas as metas gerais de desempenho de iluminação natural para espaços iluminados, que representam características de concepção bem sucedidas de iluminação natural, como discutido anteriormente.

### **2.6.1 Quantidade**

- Proporcionar os requisitos de luz natural para a maior parte do ano.

### **2.6.2 Qualidade**

- Distribuição uniforme da luz natural de forma a reduzir contrastes de brilho;
- Controlar a exposição solar directa e sempre que seja apropriado utilizar estratégias solares passivas.

### **2.6.3 Utilidade**

- Permitir aos ocupantes ajustar e controlar manualmente os sistemas de iluminação natural e artificial;
- Assegurar níveis de iluminação natural adequados para todos os ocupantes;
- Proporcionar vista e uma ligação com o exterior.

## 2.6. OBJECTIVOS DO PROJECTO DE ILUMINAÇÃO NATURAL

### 2.6.4 Integração

- Integração interior e exterior com a arquitectura do edifício;
- Integração com outros sistemas do edifício, AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), iluminação artificial, ventilação.

### 2.6.5 Custo-benefício

- Implementar no orçamento de construção do projecto;
- Obter níveis redução de consumo diminuindo os custos de iluminação e de climatização.



## Capítulo 3

# Iluminação natural, grandezas e métodos de cálculo

Ao medir o desempenho da luz natural em edifícios é preciso compreender e estabelecer critérios que avaliem o desempenho da iluminação como boa, adequada ou insuficiente. Isto é especialmente crucial quando se avalia utilizando modelos digitais.

A tentativa de quantificar alguns dos critérios de um bom caso de iluminação natural é quase impossível, enquanto outros são mais viáveis, neste sentido é necessário a obtenção de dados confiáveis para a realização da análise. Este capítulo destina-se a fornecer o conhecimento fundamental sobre os modelos de céu que estão na base de cálculo dos níveis de iluminação, grandezas adaptadas para um estudo dinâmica da luz natural, e respectivas ferramentas de simulação.

### 3.1 Modelos de céu

Dada a quantidade de condições meteorológicas existentes, são estabelecidos para os estudos de iluminação natural, três tipos de céu *standard* (Figura 3.1). Cada um deles é caracterizado por uma dada repartição da luminância da abóbada celeste. Desta forma a *Commission Internationale d'Éclairage* (CIE) recomenda a utilização dos três modelos de referência para a distribuição de luminâncias no céu (CIE, 1994).

- Céu limpo - o céu encontra-se limpo sem nuvens e o Sol é visível. A luminosidade varia tanto no horizonte como no zénite<sup>1</sup>, dependendo também da posição do Sol. Possibilita o estudo da dicotomia sombra, luz, assim como os riscos de encandeamento directo devido à penetração da luz solar directa nos edifícios.
- Céu intermédio - representa uma situação intermédia entre céu limpo e céu encoberto. Neste tipo de céu é difícil padronizar a intensidade da sua luminância, pois esta varia ao longo das horas e

---

<sup>1</sup>Zénite, segundo a perspectiva de um observador localizado num plano sobre a Terra é a intersecção na perpendicular com a abóbada celeste.

pode apresentar-se muito diferente de um dia para o outro, dependendo da quantidade de nuvens (Moore, 1991). Embora seja o tipo de céu mais frequente, não é utilizado.

- Céu encoberto - condições de céu completamente coberto por espessas nuvens escuras. No céu encoberto considera-se que a luz emitida no zénite é três vezes superior à luz emitida no horizonte. Esta distribuição é constante ao longo do dia, o que não acontece na realidade (Moore, 1991). Este modelo de céu é o aconselhado para o cálculo tradicional da luz natural, por reproduzir as condições mais desfavoráveis de luz (Coutinho, 2009).

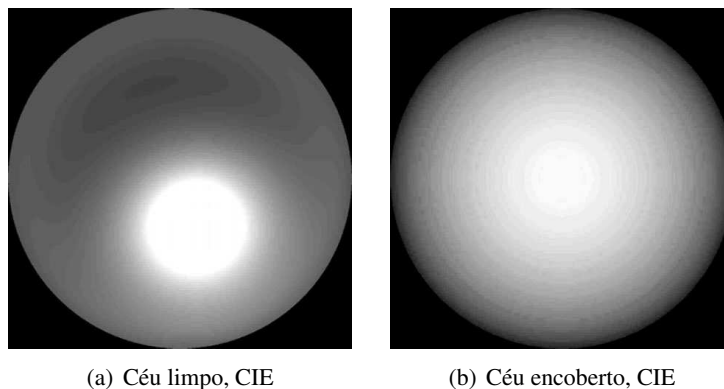


Figura 3.1: Modelos de céu, CIE (Reinhart, 2010).

Embora os modelos de céu proposto pela CIE ajudem na investigação do desempenho dos edifícios sobre condições extremas de luz natural, não permitem prever como o edifício se irá comportar durante o ano. São considerados modelos de céu estáticos e a referência de calculo para o *Daylight Factor* (DF).

### 3.1.1 Modelo de céu Perez

Para analisar o desempenho da iluminação natural ao longo do ano é necessário modelar todas as condições de céu no local de implantação do edifício. A simulação da iluminação natural em ambientes complexos (com protecção solar, formas não rectangulares, e outros) requer conhecimento de dados precisos da distribuição da luz no céu (Perez *et al.*, 1990). Na ausência desses dados recolhidos por monitorização real, o modelo tem que se basear no ficheiro climático e extrapolar os dados solares em dados de iluminação necessários para a avaliação das edificações (Perez *et al.*, 1987).

O modelo de céu de Perez *et al.* (1993) ao extrapolar esses dados, calcula a distribuição da luz directa e difusa ao longo do ano, sendo utilizado em programas de simulação como *Energyplus* e *Daysim*.

O modelo consiste em dois modelos independentes:

- O modelo de eficácia luminosa, calcula a média da eficácia luminosa da luz do sol difusa e da luz directa para um tipo de céu considerado. Os parâmetros necessários são o ângulo zenital, altitude solar, iluminância directa e difusa bem como a precipitação atmosférica (Reinhart, 2010).
- O modelo de distribuição luminosa, produz a distribuição da luminosidade do céu baseado no dia, hora, iluminância directa e difusa. O modelo é composto por cinco parâmetros: a escuridão

### 3.2. GRANDEZAS E ABORDAGEM TRADICIONAL SOBRE A ILUMINAÇÃO NATURAL

ou brilho do horizonte, o gradiente de luminosidade perto do horizonte, a intensidade relativa da região circunsolar, a espessura da região circunsolar e a intensidade relativa da luz dispersa à superfície da terra (Reinhart, 2010).

Para condições de céu muito escuras ou claras o modelo de céu de Perez *et al.* (1993) reduz-se ao céu CIE encoberto ou limpo (Reinhart, 2010).

## 3.2 Grandezas e abordagem tradicional sobre a iluminação natural

Os métodos para avaliação das condições de iluminação tem-se baseado tradicionalmente em apenas um parâmetro: a iluminação horizontal. Tanto estudos, como dados empíricos indicam que não é apenas a iluminância no plano de trabalho que é importante, muitos outros aspectos como; a distribuição de iluminância pelo campo visual, uniformidade, variações ao longo do tempo, etc, devem ser consideradas (Goodman, 2009). A simples consideração da iluminância horizontal no plano de trabalho é uma limitação que não representa uma metodologia viável e completa para avaliação das condições de iluminação. A componente não horizontal da iluminação precisa de ser considerada porque esta é a componente percebida pelos ocupantes.

### 3.2.1 *Daylight Factor* (DF)

Para além dos projectistas aplicarem uma gama limitada de parâmetros que avaliam o desempenho da iluminação, as próprias metodologias têm igualmente limitações. Por exemplo, o uso do indicador *Daylight Factor* (DF) ou em português, Factor de Luz do Dia (FLD) como parâmetro capaz de avaliar a iluminação natural nos edifícios. O DF é definido como uma relação de iluminação interior num ponto horizontal com a iluminação exterior sobre o céu encoberto (rácio de iluminância interior com iluminância exterior). Quanto maior o DF, maior a disponibilidade de luz natural no espaço (Saxena, 2008). Só pela definição é notória a debilidade do DF, este é insuficiente devido às suas limitações. No Quadro 3.2 encontra-se discriminado as vantagens e desvantagens da aplicação do *Daylight Autonomy* como medida estática da avaliação da luz natural.

O *Daylight Factor* como único parâmetro de avaliação da luz natural, transmite a mensagem errada de que quanto "mais luz, melhor", sem fornecer qualquer orientação sobre a restrição do brilho associado aos raios solares directos, sobreaquecimento ou perdas de calor em função do aumento das áreas de envidraçado (Saxena, 2008).

Um edifício com envidraçado para Norte, em Lisboa ou para Sul teria o mesmo DF. O DF tem também valores quase insignificantes num clima com maior frequência de céu limpo ou intermédio. Como resultado destas limitações, várias técnicas de aproveitamento da luz natural, como prateleiras de luz, parecem não ser de todo benéficas do ponto de vista de uma análise deste factor. As prateleiras de luz são pensadas para reflectir a luz solar directa para o tecto, convertendo-a em luz difusa útil e distribuindo-a para os locais mais afastados da fonte. Mas como um céu encoberto não tem luz solar directa, o cálculo pelo DF mostra que uma prateleira de luz é um dispositivo que se intromete no fornecimento de mais luz natural (Saxena, 2008).

## CAPÍTULO 3. ILUMINAÇÃO NATURAL, GRANDEZAS E MÉTODOS DE CÁLCULO

Quadro 3.1: Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica *Daylight Factor* (Adaptado de Love, 1990, Max, 2012, Nabil & Mardaljevic, 2005).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• Pode ser bastante exacto nos locais e altura do ano em que prevalecem condições de céu encoberto.</li><li>• Simples de calcular e pode ser obtido sem recorrer a programas de simulação.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Luz directa proveniente do sol e dos vários tipos de céu excepto o encoberto não é considerado no DF.</li><li>• O DF não tem em consideração o impacto da orientação do edifício, ou espaço.</li><li>• Os valores de DF são muito variáveis mesmo sobre o céu encoberto devido à distribuição de iluminâncias no céu ser variável.</li><li>• A iluminação integrada (natural e artificial) não é quantificada com o DF.</li><li>• A iluminação reflectida pela geometria interna, não é considerada na medição do DF.</li></ul>

A luz natural é inerentemente dependente do clima e variável com o tempo o DF não tem em conta esta realidade (Mardaljevic, 2006).

### 3.3 Grandezas dinâmicas de iluminação natural

Para resolver as deficiências do método *Daylight Factor* para quantificar a luz natural, a *Illuminating Engineering Society of North America's* (IES) criou um grupo de investigação sobre o pretexto de orientar o desenvolvimento de medidas dinâmicas de luz natural e critérios de desempenho aceitáveis. Em apoio aos objectivos do IES, o programa *California Energy Commission's Public Interest Energy Research* (CEC-PIER), o *Northwest Energy Efficiency Alliance* (NEEA) e o *New York State Energy Research and Development Authority* (NYSERDA), financiaram um conjunto de projectos com o objectivo de desenvolver uma nova métrica de luz natural. Este foi um esforço de vários anos, que estava previsto ser concluído em 2010 (Saxena, 2008).

Contrariamente às grandezas desenvolvidas no passado, que têm como único objectivo a avaliação da iluminância, um dos objectivos estabelecidos para além de avaliar a iluminância é ter a capacidade de descrever a qualidade visual do espaço (Saxena, 2008).

#### 3.3.1 *Daylight Autonomy* (DA)

DA é definido como uma percentagem das horas ocupadas por ano, nas quais se pode manter um nível mínimo de iluminância, apenas pela iluminação natural (Reinhart *et al.*, 2003). Este depende de três parâmetros: nível de iluminação do ano inteiro, as horas reais de funcionamento do espaço, e o nível de iluminância de projecto. Por exemplo tendo um DA de 70% para um local de trabalho com um horário laboral das 9:00 às 17:00 e um mínimo de 500 *lx* de iluminância indica que os ocupantes

### 3.3. GRANDEZAS DINÂMICAS DE ILUMINAÇÃO NATURAL

podem beneficiar de 70% do ano de apenas luz natural, os outros 30% do ano tem de se recorrer à iluminação artificial. Esta medida como forma de avaliar a luz natural é relativamente recente e ainda não foi estabelecida gama de valores óptimos, no entanto especialistas indicam valores de 40 a 60% como ideais (Corporation, 2012). No Quadro 3.2 encontra-se discriminado as vantagens e desvantagens da aplicação do *Daylight Autonomy* como medida dinâmica da avaliação da luz natural.

Quadro 3.2: Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica *Daylight Autonomy* (Adaptado de Max, 2012).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• DA fornece uma visão intuitiva da distribuição de luz no espaço.</li><li>• Determina quais os equipamentos que beneficiam pelo aproveitamento automático da luz natural.</li><li>• Considera as horas de uso real e as condições meteorológicas reais do local e orientação do edifício.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Só pode ser calculado com o auxílio de simulações computacionais.</li><li>• Não existe limite máximo para os níveis de iluminância permitidos, neste sentido um compartimento com exposição solar directa pode ser considerado bom no entanto não seria um espaço confortável.</li><li>• Sozinho não fornece indicações da ocorrência de brilho e da penetração de luz solar directa.</li></ul>

#### 3.3.2 *Useful Daylight Illuminances* (UDI)

UDI indica a possibilidade de haver níveis elevados de iluminância que estão associados ao desconforto e a ganhos solares excessivos. O índice é dado pela frequência horária da iluminância de acordo com as seguintes faixas pré-estabelecidas, 0-100 *lx*, 100-2000 *lx*, e acima de 2000 *lx*. Na sua essência é baseado em factores humanos, permitindo verificar qual a porção do ambiente que possui valores úteis (não muito baixos, nem valores que possam causar ofuscamento ou ganho de calor), essa gama de valores está a ser discutida embora esteja estabelecida entre os 100 *lx* e 2000 *lx*, sugerindo que valores de iluminação horizontal fora desta gama não são benéficos (Nabil & Mardaljevic, 2006). No Quadro 3.3 encontra-se discriminado as vantagens e desvantagens da aplicação do *Useful Daylight Illuminances* como medida dinâmica da avaliação da luz natural.

Quadro 3.3: Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica *Useful Daylight Illuminances* (Adaptado de Max, 2012).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"><li>• As mesmas vantagens que o DA, com o acréscimo de avaliar o brilho e o desconforto térmico.</li><li>• Bom para comparar o desempenho das variações de concepção.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Dado que para cada sensor existem três gamas de valores torna-se mais difícil de avaliar ou transmitir o conhecimento a não peritos do desempenho lumínico do espaço.</li></ul>

### 3.3.3 *Daylight Autonomy maximum* (DA<sub>max</sub>)

DA<sub>max</sub> proposto como medida para quantificar fontes de luz intensas e áreas susceptíveis de brilho e reflexos, refere-se às horas do ano onde os níveis de iluminância são extremamente elevados e é definido como dez vezes maior que a iluminância de projecto. Esta grandeza indica quando as iluminâncias estão demasiado elevadas no plano de trabalho, auxiliando a resposta ao requisito de iluminação do ambiente está "bem distribuída e equilibrada". No Quadro 3.4 encontra-se descrito as vantagens e desvantagens da aplicação do *Daylight Autonomy maximum* como medida dinâmica da avaliação da luz natural.

Quadro 3.4: Vantagens e desvantagens da aplicação da métrica *Daylight Autonomy maximum* (Adaptado de Corporation, 2006).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indica os locais susceptíveis de brilho.</li> <li>• Considera as horas de uso real, as condições meteorológicas reais do local e orientação do edifício.</li> <li>• Bom para comparar o desempenho das variações de concepção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não indica a quantidade e distribuição da luz natural ao longo do ano.</li> </ul>

### 3.3.4 Conclusões das grandezas dinâmicas de iluminação natural

As grandezas descritas acima surgem como medidas dinâmicas de avaliação da luz natural que são expressas em séries anuais de iluminância e que têm em consideração as características específicas da região na qual o objecto de estudo se encontra.

Estas medidas facilitam a avaliação da luz natural, no entanto não permitem avaliação dos balanços energéticos para aquecimento, arrefecimento e ventilação decorrentes do aproveitamento da luz natural. Esta limitação induz a optimização apenas numa direcção, o uso da luz natural, introduzindo ao mesmo tempo necessidades de aquecimento e/ou de arrefecimento indesejáveis.

## 3.4 Parâmetros de avaliação do desempenho energético e visual

De forma a evitar o conflito que advém da optimização exclusiva para a economia de energia ou para o conforto visual, é necessário saber quais os critérios e limites para as soluções respeitarem os dois requisitos (Quadro 3.5).

### 3.4. PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E VISUAL

Quadro 3.5: Critérios utilizados para o conforto térmico, visual e avaliação de desempenho (Adaptado de Ochoa *et al.*, 2012).

	Aspectos energéticos	Aspectos visuais
Desempenho	Consumo Graus dias Conforto adaptativo	Iluminância
Conforto	Voto médio previsto (diferentes índices) Temperatura e humidade relativa prevista	Uniformidade Contraste <i>Daylight glare index</i> <i>Daylight glare probability</i>
Avaliação dinâmica térmica e visual	Condição de tempo  Média (anual, mensal, etc.) Escala de utilização (máximo-mínimo)	

#### 3.4.1 Parâmetros de desempenho energético

Os critérios de desempenho energético quantificam o consumo sobre o aquecimento, arrefecimento, luz artificial e ventilação. São expressos em unidades de energia (*KWh* ou *GJ*) por unidade de área, por unidade de tempo. O objectivo é seleccionar o sistema com menor consumo energético, que só por si é útil para obter certificação ambiental, BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) ou LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) ou obedecer às certificações energéticas nacionais como o RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios) e o RSECE (Regulamento de Sistemas Energéticos e Climatização de Edifícios).

O conforto dos ocupantes também pode ser usado para avaliar o desempenho energético utilizando diferentes índices e métodos de previsão. Alguns estão detalhados no Quadro 3.5.

#### 3.4.2 Parâmetros de desempenho visual e de conforto

Os ocupantes estão constantemente expostos a diferentes tipos de estímulos. No entanto, tem-se observado que o desconforto devido aos efeitos visuais é relatado mais frequentemente que o desconforto por efeitos térmicos, devido ao atraso sensorial em experienciar este último (Achard *et al.*, 1997).

A norma EN-12464-1 propõe os seguintes parâmetros de iluminação que devem ser adequadamente quantificados de forma a determinar o ambiente luminoso: distribuição da iluminação, iluminância, brilho, orientação da luz, restituição de cor e aparência da cor da luz, cintilação (EN12464-1, 2002). Os parâmetros propostos pela norma são aplicados para fontes de iluminação eléctrica geral, logo para avaliar sistemas de iluminação natural basta definir a iluminância, distribuição da iluminação e o brilho (Aschehoug *et al.*, 2000).

Deste modo, os aspectos de iluminação natural que podem ser adequadamente quantificados e tratadas através das medidas dinâmicas incluem:

- Quantidade - Fornecer os requisitos de iluminação ambiente. A medida *Daylight Autonomy* (DA) é proposta para resolver a questão de fornecer a quantidade certa de luz para um espaço numa base anual (Corporation, 2006).
- Qualidade - Distribuição uniforme da luz natural. Uma nova medida é proposta para responder à uniformidade da luz natural que requer um mínimo de área iluminada com um nível de *Daylight Autonomy* (Corporation, 2006).
- Qualidade - Controlar a luz solar directa, quando necessário. O factor como *Daylight Autonomy maximum* (DAm<sub>ax</sub>) é proposto como medida para quantificar fontes de luz intensas e áreas susceptíveis de brilho (Corporation, 2006).

### 3.5 Ferramentas de simulação

O papel das simulações computacionais no desenvolvimento dos edifícios é fornecer informação eficiente que possa suportar várias decisões. A avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares.

Para uma simulação computacional é necessário avaliar os casos a partir das suas características dimensionais, componentes construtivos, iluminação, sistemas de climatização e tratamento do ar novo, ventilação, equipamentos, ocupação e horários. Através do tratamento destas variáveis pode-se estimar o consumo de energia, o custo desse consumo e o impacto ambiental provocado pelas várias hipóteses de concepção mesmo antes da sua construção e instalação.

As ferramentas de simulação da luz natural são pouco utilizados por arquitectos e engenheiros em comparação com ferramentas relativas a outras áreas. De certo modo, a simulação da luz natural tem a reputação de ser complicada e até um luxo. Pesando os ganhos do tempo dispendido para obter essa informação contra o tempo e recursos financeiros investidos, poderão não ser compensatórios.

#### 3.5.1 Ferramentas de simulação dinâmica

A simulação dinâmica é um método de análise computacional do perfil e consumos energéticos do edifício. Hoje em dia existem vários programas capazes de cumprir os requisitos de uma simulação dinâmica. Por outro lado, não existe apenas uma ferramenta capaz de realizar todo o tipo de simulações. Deste modo o utilizador é confrontado com a escolha do mesmo.

Efectuar a simulação de edifícios envolve entender a natureza do problema a ser resolvido, escolher o programa adequado, saber como utilizá-lo correctamente e finalmente, interpretar os resultados (Hong *et al.*, 2000). De acordo com o DLn<sup>o</sup>79 (2006), o programa tem de ser acreditado pela norma ANSI/ASHRAE 140-2004 (Quadro 3.6).

Alguns desses programas destinam-se à análise térmica, luminosa e energética de edifícios. Os seus sistemas permitem identificar soluções para a redução de gastos com energia eléctrica, no entanto

### 3.5. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Quadro 3.6: Programas de simulação dinâmica acreditados pela norma ANSI/ASHRAE 140-2004 (Adaptado de ANSI/ASHRAE-140, 2004).

Nome	Entidade
<i>Blast</i>	CERL - U.S.Army Construction Engineering Research Laboratories, USA LANL - Los Alamos National Laboratory, USA
<i>DOE-2</i>	LBNL - Lawrence Berkeley National Laboratory, USA James J. Hirsch & Associates, USA
<i>ESP</i>	Strathclyde University, GB
<i>SRES/SUN</i>	NREL - National Renewable Energy Laboratory, USA Ecotope, USA
<i>SRES/BRE</i>	NREL - National Renewable Energy Laboratory, USA BRE - Building Research Establishment, GB
<i>S3PAS</i>	Universidade de Sevilha, Espanha
<i>TASE</i>	Tampere University, Finlândia
<i>TRNSYS</i>	University of Wisconsin, USA
<i>TRNSYS/TUD</i>	University of Wisconsin, USA Technische Universität Dresden, Alemanha
<i>CA-SIS</i>	Electricité de France, França
<i>CLIM2000</i>	Electricité de France, França
<i>ENERGYPLUS</i>	LBNL - Lawrence Berkeley National Laboratory, USA UIUC - University of Illinois Urbana/ Champaign, USA CERL - U.S.Army Construction Engineering Research Laboratories, USA OSU - Oklahoma State University, USA GARD Analytics, USA FSEC - University of Central Florida, Florida Solar Energy Center, USA DOE-OBT Department of Energy, Office of Building Technology, USA

escolher um programa “super-potente” não é só desnecessário, como se pode tornar dispendioso quando existem erros devido à elevada complexidade do mesmo.

Um exemplo de uma multiferramenta muito usada é o *EnergyPlus* que simula aquecimento, refrigeração, iluminação, ventilação, outros fluxos de energia e uso de água em edificações. Porém existem evidências que mostram que o seu algoritmo de cálculo da iluminação natural superestima os valores de iluminâncias internas. Para o cálculo da iluminação natural, estudos têm demonstrado que o *Radiance*<sup>2</sup> combinado com o *Daylight Coefficient*<sup>3</sup> e o modelo de céu de Perez *et al.* (1993) calcula de forma confiante a iluminância e luminância no interior do ambiente. O Quadro 3.7 contém uma lista programas baseados no algoritmo *Radiance* que podem ser usados para simulações dinâmicas da luz natural.

Em termos de ferramentas a usar, o método proposto recorre ao uso de ferramentas gratuitas. São utilizadas duas ferramentas de simulação: *Energyplus*, para análise do desempenho termo-energético, e o *Daysim*, para avaliação da iluminação natural.

<sup>2</sup>*Radiance* é um programa de simulação baseado no comportamento físico da luz, desenvolvido nos Estados Unidos, na Universidade da Califórnia. O programa prevê a distribuição de iluminâncias e luminâncias em edificações sob condições de céu definidas.

<sup>3</sup>O método *Daylight Coefficient* originalmente proposto por Tregenza & Waters (1983) permite calcular os níveis de iluminação interior em função da trajetória da luz do dia em condições de céu arbitrarias. A aplicação do método permite aligeirar o processo computacional de simulação anual da luz natural na ordem de minutos a horas.

### CAPÍTULO 3. ILUMINAÇÃO NATURAL, GRANDEZAS E MÉTODOS DE CÁLCULO

Quadro 3.7: Programas de simulação computacional de iluminação natural dinâmica (Adaptado de Reinhart *et al.*, 2006).

Programa	Programa Simulador	Algoritmos de simulação dinâmica	Sites [consultado em 27/01/2012]
<i>Daysim</i>	<i>Radiance</i>	<i>daylight coefficients e Perez</i>	www.daysim.com
<i>ESP-r</i>	<i>Radiance</i>	<i>daylight coefficients e Perez</i>	www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm
<i>Lightswitch Wizard</i>	<i>Radiance</i>	<i>daylight coefficients e Perez</i>	www.buildwiz.com
<i>SPOT</i>	<i>Radiance</i>	céu de simulação anual da CIE	www.archenergy.com/SPOT

#### EnergyPlus

*EnergyPlus* (E+) é um programa de simulação para modelação do comportamento energético de edifícios. Foi criado a partir da junção de dois programas, *BLAST* e *DOE-2*, e desenvolvido em conjunto com: *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories* (CERL), *University of Illinois* (UI), *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), *Oklahoma State University* (OSU), *GARD Analytics e Department of Energy* (DOE) (Crawley *et al.*, 1999). Trabalha com o balanço de calor do *BLAST*, com um modelo de ar condicionado genérico, programas de iluminação natural, e algoritmos de transferência de calor e fluxo de ar entre zonas (Crawley *et al.*, 1999).

O programa estima o consumo de energia considerando as trocas térmicas entre edifício e o exterior com base no clima e na caracterização do edifício ou da sala a ser estudada: desde a geometria, componentes construtivos, cargas instaladas, sistemas de tratamento de ar, ventilação e padrões de utilização e ocupação (Crawley *et al.*, 1999).

Um dos pontos fortes do E+ é a integração de todos os aspectos relacionados com uma simulação energética de um edifício: cargas térmicas, centrais de produção de energia térmica e sistemas de ventilação e ar novo. O cálculo é feito de modo a ter em conta o impacto dos sistemas na resposta térmica do edifício em vez de calcular primeiro as cargas térmicas e depois aplicar as soluções de climatização ao processo (Cartas, 2011). O E+ apresenta múltiplos campos onde o utilizador, ao preenchê-los, vai fornecendo informações acerca do modelo de estudo e do tipo de simulação que pretende realizar. Estes campos constituem o ficheiro “.idf” que não é mais que um simples ficheiro de texto.

Ramos (2008) avaliou, o cálculo da iluminação natural através da comparação das iluminâncias internas calculadas com as simulações realizadas pelos programas *EnergyPlus*, *Daysim*. Demonstrando que E+ apresenta uma debilidade no cálculo da reflectância interna, o que conduz a valores superestimados de iluminância interna. Didoné (2009), Versage *et al.* (2010) também relatam o mesmo problema, tal como Ramos (2008), examinam a influência em simular a iluminação natural pelo E+ e pelo *Daysim*. Demonstram que os altos níveis de iluminação, resultantes do E+, reduzem em muito os consumos de energia eléctrica quando comparado com o consumo proveniente da simulação integrada entre o *Daysim* e o E+.

### 3.5. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

#### Daysim

A ferramenta *Daysim*, desenvolvido pelo *National Research Council Canada* (NRCC) foi elaborado com o intuito de calcular as iluminâncias para o período de um ano, de forma rápida e independente do tipo de céu (Reinhart, 2010). Este utiliza os ficheiros climáticos, os mesmos utilizados no E+, que contêm uma série horária de dados solares, interpolando as séries horárias em séries sub-horárias.

O *Daysim* simula a iluminação natural através do *Daylight Coefficient*, baseando-se no programa *Radiance*, que utiliza o método do algoritmo *Ray-trace*<sup>4</sup>, e no modelo de céu desenvolvido por Perez *et al.* (1993), para desta forma, possibilitar a simulação das iluminâncias sob qualquer condição de céu. Para calcular perfis anuais de iluminação é apenas necessário a ferramenta *Radiance*, no entanto esta abordagem em termos computacionais não é prática porque cada simulação para cada tipo de céu pode levar horas, logo para um perfil anual, leva literalmente um ano de cálculo.

A simulação tal como no E+ é realizada a partir de um modelo tridimensional, no entanto aqui só são definidas as propriedades ópticas das superfícies. Além do cálculo das iluminâncias, o programa permite o cálculo do *Daylight Factor* (DF), *Daylight Autonomy* (DA), *Continuous Daylight Autonomy* (DAcon), *Daylight Autonomy maximum* (DAmx) e *Useful Daylight Illuminances* (UDI) para cada ponto de referência. Outra possibilidade é a verificação do consumo da iluminação artificial de acordo com diferentes padrões de uso (número de pessoas no local e horas de permanência), iluminância de projecto, potência e sistema de controle da iluminação artificial.

*Daysim* tem também o algoritmo comportamental *Lightswitch2002* desenvolvido por Reinhart (2004) que consegue prever o comportamento dos ocupantes em função da sua interacção com ambiente calculando com bastante precisão o desempenho energético de iluminação, de sistemas de iluminação artificial e de mecanismos de sombreamento controlados manualmente e automaticamente. Este considera utilizadores activos e passivos, os activos têm um comportamento mais económico no controlo das luzes e dos elementos de protecção internos, enquanto o passivo tende a um desleixo e uso da iluminação artificial (Bourgeois *et al.*, 2006). O algoritmo permite a simulação sub-horária do uso da iluminação a partir do seu comportamento dinâmico e possibilita exportar um relatório de utilização dos sistemas de iluminação e proteções solares em todas as horas do ano (Bourgeois *et al.*, 2006).

#### EnergyPlus e Daysim

Devido às limitações do E+ no cálculo da distribuição da iluminação natural, podem ser utilizados dois programas de simulação: o *Daysim*, para a análise anual da iluminação e o E+ para a verificação do desempenho energético da edificação.

O *Daysim* calcula o perfil anual de iluminâncias e luminâncias internas através de arquivos climáticos do E+ e trabalha com o algoritmo do *Radiance*. Quando se faz uma análise da iluminação natural, o *Daysim* gera automaticamente um arquivo de dados (\*.intgain.csv) que contém a carga eléctrica gasta com

<sup>4</sup>O método utilizado pelo algoritmo, baseia-se na simulação do trajecto que os raios de luz percorrem. No entanto, este limita-se a inverter o sentido do trajecto dos raios de luz, passando o observador a ser a fonte. Desta forma computacionalmente apenas são processados os raios que efectivamente são vistos pelo observador dando aos objectos a sensação de cor, textura e transparência. (Glassner, 1989, Rogers, 1985, Wallace *et al.*, 1987, Watt, 2000)

iluminação. O arquivo contém os resultados anuais da simulação detalhados, em intervalos de tempo, de hora em hora. Entendendo o problema do E+ e o funcionamento dos dois programas, surge a ideia de integrar os resultados do *Daysim* no E+, deste modo é possível calcular o potencial de redução do consumo energético recorrendo à luz natural.

Pesquisas sobre a integração entre o *Daysim* e o E+ são demonstradas em investigações como Didoné (2009), Reinhart & Wienold (2011), Versage *et al.* (2010) fornecendo bons resultados na combinação destes dois programas.

### 3.5.2 Modelação tridimensional

Sendo o E+ e o *Daysim* ferramentas de simulação de aspecto pouco interactivo eles podem ser usados em conjunto com uma interface gráfica que facilite a parametrização do modelo (ex. geometria, envolvente, ocupação, iluminação, etc.).

O programa de modelação tridimensional *Google Sketchup* é amplamente utilizado pela maioria das escolas de arquitectura e engenharia em todo o mundo. Este programa de 3D CAD tem uma interface amigável e de fácil aprendizagem. Lê todos os arquivos DXF e DWG e tendo uma versão gratuita torna-se no parceiro ideal. Com o recente desenvolvimento de *plugins* que ligam o *Sketchup* às ferramentas de simulação, E+ e *Daysim*, é possível simular geometrias cada vez mais complexas e próximas das reais.

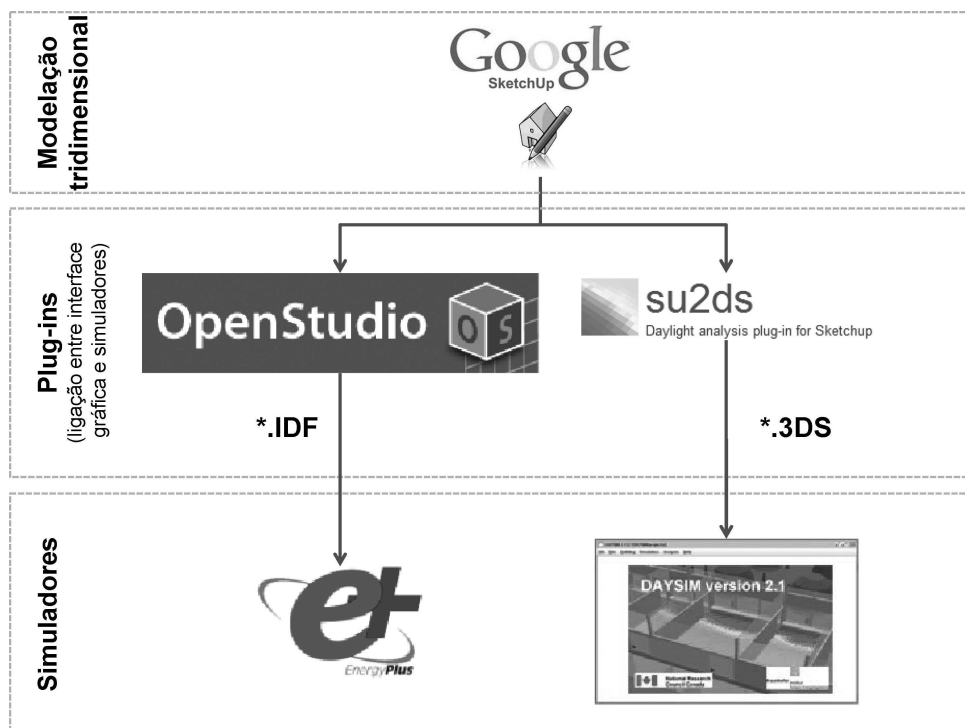


Figura 3.2: Proposta de organização do processo de simulação. *Google Sketchup* é a ferramenta de ponta que liga o CAD com as ferramentas de conforto térmico (E+) e visual (*Daysim*)

### 3.5. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

#### **Openstudio**

O *Openstudio* é um plugin para visualizar/parametrizar os dados de entrada do E+. Toda a informação criada através do *OpenStudio* é compilada num ficheiro OSM, de extensão “.osm” (*OpenStudio Model*) este só é passível de ser editado e reconhecido pelo E+ após simulação ou conversão para IDF. Assim sendo os dados para simulação são inseridos através de dois ficheiros editados pelo utilizador, o já mencionado IDF, que pode ser criado integralmente no E+ ou com ajuda da interface gráfica do *OpenStudio*, e o arquivo de dados climáticos de extensão “.epw” (*Energy Plus Weather File*).

O *OpenStudio* facilita o utilizador na criação e parametrização do modelo 3D, embora apresente limitações muito significativas do ponto de vista da parametrização do sistema de AVAC, disponibilizando poucas soluções para sistemas de produção térmica e ventilação e que muitas vezes se tornam pouco realistas. Neste sentido caso o utilizador pretenda parametrizar o seu sistema de AVAC de forma rigorosa, impõem-se que o faça ao nível do próprio E+ e não no *Openstudio* (Cartas, 2011).

#### **Su2ds**

Plugin *Su2ds* para o *SketchUp* desenvolvido por *Josh Kjenner* para a consultora *Manasc Isaac Architects* localizada no Canadá (*Edmonton, Alberta*) com o apoio *National Research Council's* (NRC) e *Industrial Research Assistance Program* (IRAP).

A simulação é realizada a partir de um modelo tridimensional do ambiente a ser analisado. O modelo é importado do programa *Sketchup*. No modelo são definidas as propriedades ópticas das superfícies, orientação e grelha de análise, do arquivo climático são retirados dados como latitude, longitude e radiação. De forma a poder visualizar os resultados da simulação do *Daysim* é necessário importar os mesmos de volta para o *SketchUp*.



## Capítulo 4

# Metodologia e caso de estudo

Para avaliar o desempenho visual e térmico dos edifícios, é necessário desenvolver uma metodologia de trabalho simples e que é explicada ao longo deste capítulo. Assim, neste capítulo são abordados alguns aspectos relevantes para a obtenção dos resultados propostos. Começa-se por dividir em três etapas: a primeira etapa que apresenta a construção dos modelos a simular ao longo de todo o trabalho; a segunda descreve as simulações com *EnergyPlus* e *Daysim*; e a terceira etapa descreve como os resultados são analisados (Figura 4.1). A metodologia tem como base os trabalhos desenvolvidos por Bokel (2007), Didoné (2009), Ramos & Ghisi (2010), Rupp (2011).

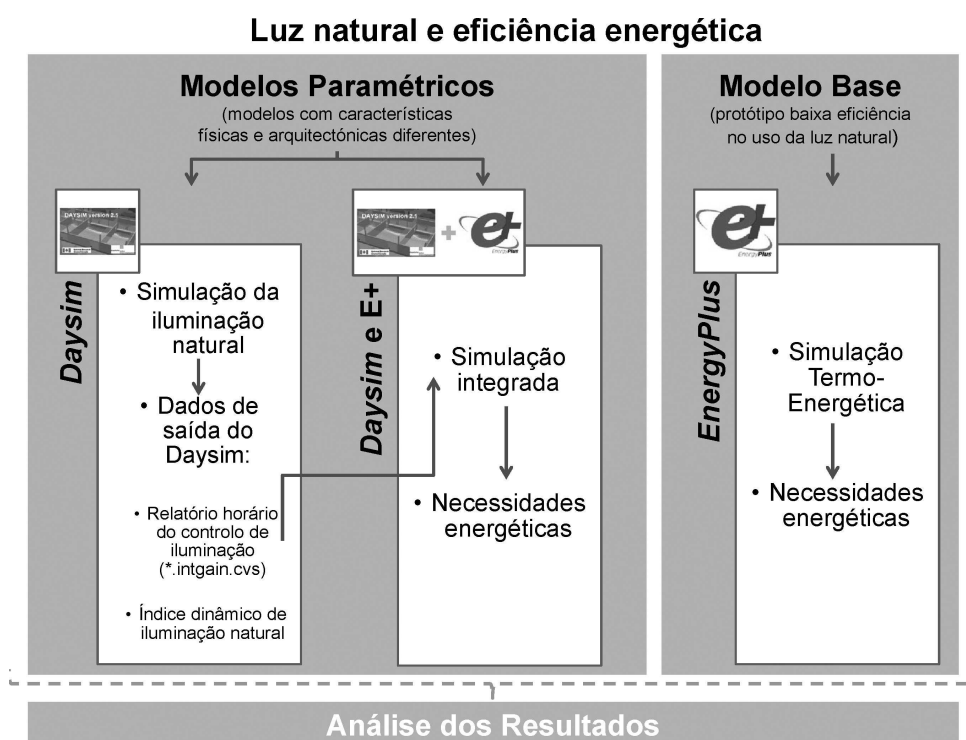


Figura 4.1: Metodologia (Adaptado de Didoné, 2009).

A primeira etapa define os modelos a simular ao longo do trabalho, geometria utilizada, a constituição

da envolvente opaca, equipamentos, sistemas de iluminação artificial entre outros.

A segunda etapa tem a descrição das simulações computacionais necessárias para a elaboração do estudo. Estas são divididas em três tipos: simulação de iluminação natural através da ferramenta *Daysim*, para avaliar o comportamento dinâmico da luz natural e obter os dados energéticos (luz artificial) necessários para a simulação energética integrada; simulação termo-energética através da ferramenta E+, utilizando modelos base, para avaliação comparativa dos modelos; e a simulação energética integrada através da ferramenta E+ para a obtenção dos dados referentes ao consumo energético dos modelos analisados. Ao longo deste etapa serão também indicados alguns valores necessários ao programa de simulação dinâmica E+ e *Daysim*.

Por fim, a terceira etapa onde se explica o processamento e análise dos dados obtidos nas simulações.

## 4.1 Localização e descrição do clima

O modelo é avaliado no clima de Portugal, numa zona urbana na cidade de Lisboa (região climática I1-V2) (DLn°80, 2006). A temperatura máxima é registada no dia 29 de Agosto, às 15h com 35,8°C e um valor de temperatura mínima no dia 31 de Janeiro às 8h com 4,2°C (Quadro D.1).

*Quadro 4.1:* Localização do edifício, latitude, longitude, fuso horário e altitude.

Cidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Fuso horário GMT (h)	Altitude (m)
Lisboa	38,73°N	9,15°W	0	71

## 4.2 Construção dos modelos

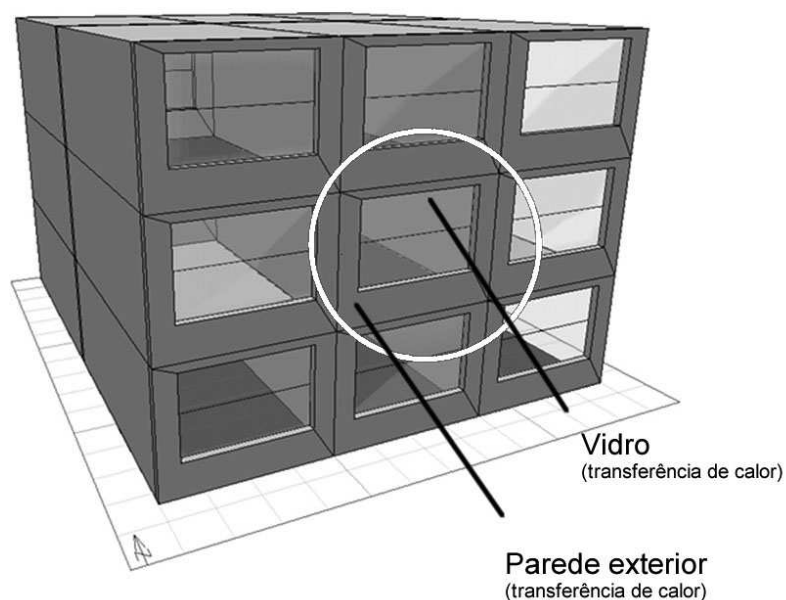
O modelo em estudo é um edifício não residencial de escritórios. Para a construção dos modelos é necessário proceder a um levantamento das informações das tipologias mais frequentes nos edifícios de serviço na cidade de Lisboa.

### 4.2.1 Características dos modelos

Para a construção dos modelos são levantados dados da literatura e de trabalhos já realizados. Esses dados servem de base para a elaboração de um modelo representativo da realidade construtiva local. A geometria adoptada é uma geometria rectangular simples, que procura simular um escritório. No que diz respeito à inserção do modelo de estudo no edifício, procurou-se simular um escritório dum piso intermédio, ao nível de um quarto ou quinto andar, confinada por outros escritórios do mesmo edifício, para que as trocas de calor ocorram pela envolvente opaca aconteçam apenas por uma parede, a parede de fachada principal (Figura 4.2). Com esta premissa limitam-se as trocas de calor pela envolvente opaca

## 4.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

a apenas uma parede, pois considera-se que os escritórios adjacentes se encontram igualmente em uso e que os espaços comuns do edifício apresentam uma temperatura semelhante à que se verifica no interior dos escritórios.



*Figura 4.2:* Para a simulação térmica considera-se o escritório confinado por outros termicamente similares (Adaptado de Reinhart & Wienold, 2011).

Assim é possível, de uma maneira mais correcta, avaliar as trocas de calor que se processam ao nível dos vãos envidraçados e compreender a influência que cada factor que irá ser analisado terá no comportamento luminoso e térmico do modelo de estudo.

### Parâmetros construtivos

Aqui estão descritas as características de cada um dos elementos da envolvente para os compartimentos em estudo. Os materiais constituintes de cada elemento e as respetivas propriedades térmicas são apresentados do interior para o exterior das zonas.

Como referido anteriormente, os modelos são pensados de modo a só existir trocas de calor e admissão de luz pela fachada principal no entanto sem importância para as trocas de calor com o restante meio envolvente, procurou-se adoptar soluções correntemente utilizadas para a restante envolvente opaca (Quadro 4.2).

A escolha da cor e dos materiais tem grande importância na propagação da iluminância no plano de trabalho. Os modelos possuem paredes e tecto com tons claros, com reflectância igual a 70% e 50% respectivamente e piso escuro, com reflectância igual a 20% (Quadro 4.3).

Quadro 4.2: Descrição das propriedades dos materiais (Energy, s.d., Santos & Matias, 2006).

	Material	$e$ (m)	$\lambda$ (W/m.C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/Kg.K)
Parede exterior	1 reboco	0,020	1,15	1950	837
	2 tijolo furado	0,110	0,41	1100	936
	3 espaço de ar	0,025	0,24		
	4 poliestireno extrudido	0,025	0,034	45	1200
Parede interna	1 reboco	0,020	1,15	1950	837
	2 tijolo furado	0,110	0,41	1100	936
Laje intermédia	1 reboco	0,020	1,15	1950	837
	2 betão armado	0,220	1,36	2150	1080
	3 argamassa	0,050	1,20	2200	837
	4 cerâmica	0,010	1,30	2300	837

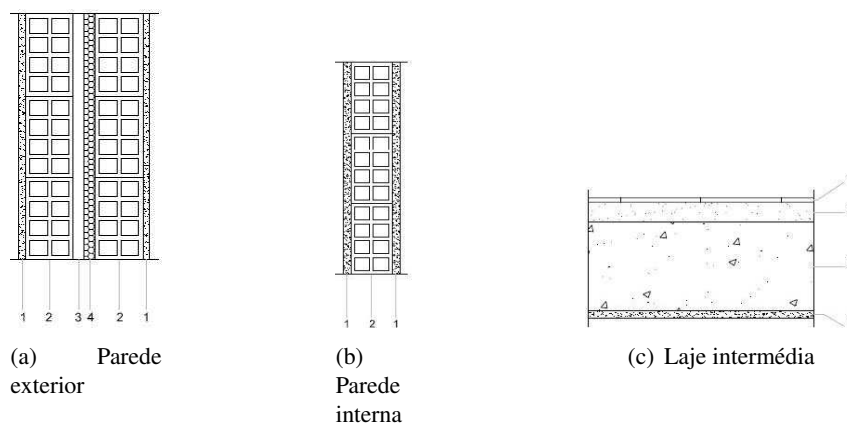


Figura 4.3: Representação dos materiais do Quadro 4.2.

Quadro 4.3: Cores e coeficientes de reflexão ou reflectâncias recomendadas para as superfícies do local de trabalho (EN12464-1, 2002).

Superfícies	Cores	Reflectâncias
Tecto	Branco ou cores mais claras	0,6 – 0,9
Paredes	Cores claras	0,3 – 0,8
Pavimento	Cor mais escura que das paredes e tecto	0,1 – 0,5

### Equipamentos e padrão de ocupação

As cargas térmicas geradas no interior do edifício provêm de três fontes distintas: ocupação, equipamentos eléctricos e iluminação. Estes ganhos são considerados úteis durante o Inverno, uma vez que reduzem o valor das necessidades de aquecimento, enquanto que no Verão são indesejáveis, contribuindo para situações de sobreaquecimento.

**Climatização e ventilação.** Para manter a temperatura interna entre 20° e 25°C (DLn°80, 2006), o sistema de aquecimento e arrefecimento considerado é um aparelho de ar-condicionado do tipo *split* de

## 4.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

janela.

O sistema de ar condicionado de classe energética A, é auto-dimensionado pelo E+ com um COP (*Coefficient Of Performance*) igual a 3,6  $W/W$ , de acordo com a área dos modelos. Como o E+ só tem como dado de entrada o COP do compressor, estima-se em 90% a contribuição do compressor no COP real do sistema de ar-condicionado, resultando num COP fictício de 4,0  $W/W$  para o compressor.

Para realizar o auto-dimensionamento o E+ requer o dia de projecto de inverno e de verão (Quadro 4.4), estes dias são obtidos estatisticamente a partir do ficheiro climático de Lisboa.

Quadro 4.4: Dias de projecto de inverno e de verão para a cidade de Lisboa.

Descrição	Inverno	Verão
Mês	1	8
Dia	21	21
Tipo de dia	<i>DesignDay</i> de Inverno	<i>DesignDay</i> de Verão
Temperatura máx. de bulbo seco (°C)	4,2	34,2
Amplitude térmica diária (deltaC)	0	10,1
Tipo de indicador de humidade	Bulbo húmido	Bulbo húmido
Condições de humidade máx de bulbo seco	4,2	20
Pressão (Pa)	99963	99963
Velocidade do vento (m/s)	2,2	4,4
Direcção do vento (graus)	50	330

O funcionamento do sistema de ar-condicionado ocorre das 8 às 18horas de segunda a sexta-feira.

A taxa de renovação de ar ( $R_{ph}$ ) é fixada de acordo com o RSECE, considerando um edifício de serviço e o compartimento gabinetes. O caudal de ventilação é analisado pelo E+ na fase de auto dimensionamento do *split*, como sendo o maior dos valores (Quadro 4.5). A eficiência total do ventilador é estipulada em 0,5.

Quadro 4.5: Caudais mínimos de ar novo (DLn<sup>o</sup>79, 2006).

Tipo de atividade	Caudais mínimos	
	$m^3/(h.ocup)$	$m^3/(h.m^2)$
Serviços    Gabinetes	35	5

**Perfis de utilização.** O RSECE propõe uma série de perfis nominais. Estes padrões nominais são as condições interiores de referência (temperatura e humidade). A simulação do funcionamento de um edifício com base nos padrões nominais dá origem ao designado “consumo nominal específico” ou que traduz uma estimativa da energia utilizada para o funcionamento de um edifício durante um ano tipo, por unidade de área ou por unidade de serviço prestado (Adene, 2011). Estes perfis de ocupação, iluminação e de equipamentos encontram-se disponíveis detalhadamente no Apêndice C.

Como o Daysim utiliza o algoritmo comportamental *Lightswitch2002* que prevê a resposta dos ocupantes, este só permite a introdução da hora de início e de fim, gerindo internamente as ausências a meio da manhã, almoço e meio da tarde. Deste modo não se utiliza o perfil de ocupação proposto pelo RSECE (Quadro 4.6).

Quadro 4.6: Perfis de utilização adoptados.

	Ocupação	Iluminação	Equipamentos
Modelos Base	2 <sup>a</sup> a 6 <sup>a</sup> das 8h-18h <sup>a</sup>	Perfil nominal, RSECE	Perfil nominal, RSECE
Modelos Paramétricos	2 <sup>a</sup> a 6 <sup>a</sup> das 8h-18h <sup>a</sup>	Perfil optimizado com o aproveitamento da iluminação natural	Perfil nominal, RSECE

<sup>a</sup> Os ocupantes deixam o posto de trabalho, 30min durante a manhã, 1h ao meio dia e 30min à tarde.

**Densidades.** Quanto às densidades, apenas são fornecidas pelo RSECE as densidades de ocupação e de equipamentos pelo que a densidade de iluminação é dimensionado de forma a corresponder às necessidades (Quadro 4.7).

Quadro 4.7: Valores das densidades (DLn<sup>o</sup>79, 2006).

Densidades	
Ocupação	15 m <sup>2</sup> /Ocupante
Iluminação	—
Equipamentos	15 W/m <sup>2</sup>

### Sistema de iluminação artificial

Esta é a fase de um projecto luminotécnico em que se calcula o número de armaduras a incluir no local para que se obtenha o nível de iluminância desejado no plano de trabalho. O sistema de iluminação artificial é dimensionado a partir do projecto luminotécnico, baseado no Método dos Lumens, pois trata-se de um método simples e robusto, apesar de ter algumas limitações, visto só ser aplicável em locais fechados e paralelepípedicos com paredes perfeitamente difusoras, com factor de reflexão uniforme e cujo plano de trabalho a iluminar seja horizontal. Actualmente existem ferramentas grátis como o *Dialux*, ou o *Relux* que fazem este cálculo ultrapassando estas limitações, além de terem a vantagem de usar uma base de dados com informações dos produtos da maioria dos fabricantes de luminárias.

O Método dos Lumens, consiste em determinar a quantidade de fluxo luminoso (lumens) necessário baseado no tipo de actividade desenvolvida, cores das paredes e tecto e do tipo de lâmpada-luminária escolhidos. De acordo com o fabricante das lâmpada-luminária Philips o método dos lumens varia na obtenção do factor de utilização e do factor de manutenção (Apêndice A). Os casos de estudo são equipados com luminárias montadas à superfície cumprindo as mais recentes normas EN-12464-1. Cada luminária contém 2 lâmpadas fluorescentes tubulares TL5 de 28W (Quadro 4.8) proporcionando uma potência instalada de 7W/m<sup>2</sup>.

Quadro 4.8: Especificações técnicas do conjunto lâmpada-luminária utilizada no projecto luminotécnico (Philips, 2012).

Código comercial Philips	Potência (W)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Temperatura cor (K)
TCS260 2x28W/840 HFP C6 WH	28	2600	97	4000

## 4.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

Para o máximo aproveitamento da luz eléctrica são usados detectores de presença e de iluminância. De forma a garantir que a iluminação artificial seja diminuída ou desligada quando a luz natural alcançar os níveis de iluminação desejados.

### Níveis de iluminação recomendados

A iluminância exprime o aspecto quantitativo da iluminação e a sua distribuição no plano de trabalho têm um grande impacto na rapidez, segurança e conforto que uma pessoa necessita para levar a cabo a tarefa (EN12464-1, 2002). O nível de iluminância recomendado para uma dada tarefa diz respeito à quantidade de luz que se considera necessária à sua boa execução (André, s.d.).

Um nível de iluminação demasiado elevado é muitas vezes desaconselhado, podem observar-se fenómenos de reflexão, de encadeamento, de contraste demasiado marcados.

O cálculo luminotécnico baseia-se nos níveis de iluminâncias recomendados para cada local (Quadro 4.9). É adoptado o valor de 500  $lx$  como iluminação de projecto recomendada.

Quadro 4.9: Necessidades de iluminação para interiores, escritórios (EN12464-1, 2002).

Tipo de interior, tarefa ou atividade	Iluminância média $E_m(lx)$
Preencher, copiar, etc.	300
Escrever, ler, processamento de dados	500
Desenho técnico	750
Posto de trabalho DAC	500
Sala de conferências e reuniões	500
Recepção	300
Arquivos	200

### 4.2.2 Modelos para simulação

Para as simulações serão utilizados três modelos com dimensões diferentes. Estes modelos representam escritórios em forma de paralelepípedo, com a fachada a medir 8m de largura e a profundidade a variar de 4m, 8m e 16m (Figura 4.4). As profundidades de 4m e 16m são escolhidas de forma a manter a largura da fachada constante e ao mesmo tempo ser possível analisar duas salas com dimensões proporcionais e aberturas em lados diferentes. Todos os modelos têm o mesmo pé direito, 2,70m.

Ao longo da discussão de resultados é usado os seguintes acrónimos de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: M1 (Modelo 1, 8x4x2,7m), M2 (Modelo 2 8x8x2,7m) e M3 (Modelo 3 8x16x2,7m).

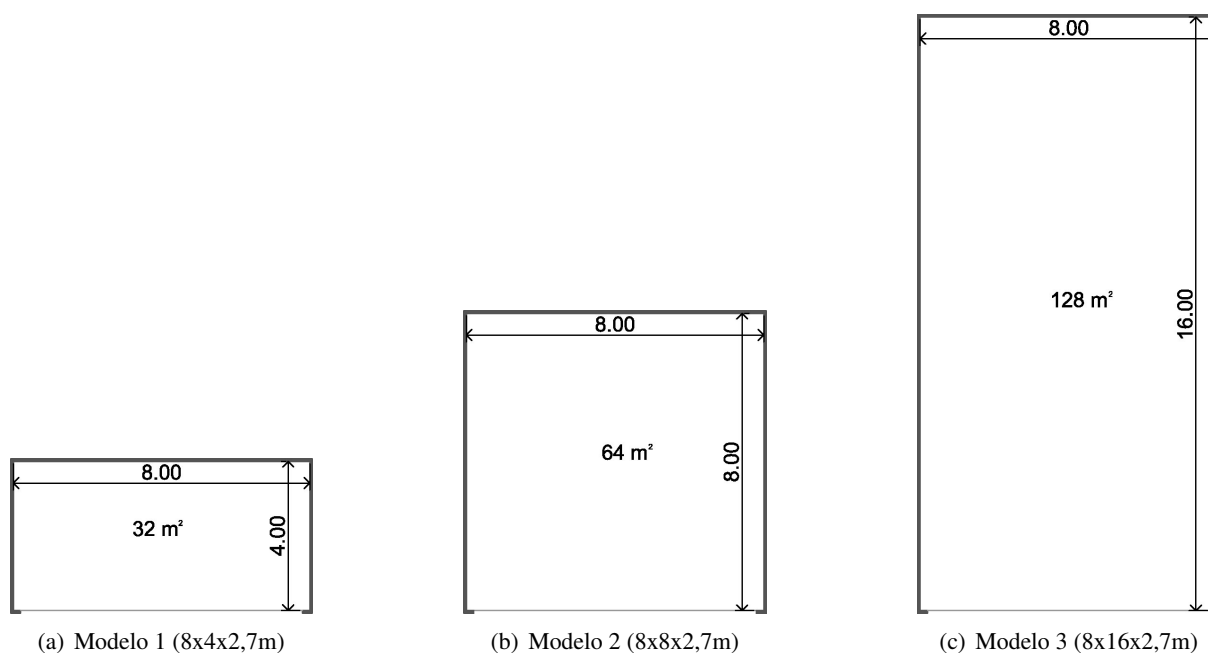


Figura 4.4: Dimensões dos modelos estudados.

### Modelos paramétricos

Neste ponto é explicada as alterações efetuadas aos modelos de estudo para que se possa alcançar conjunto de dados com diversas combinações de parâmetros construtivos que interferem no comportamento da luz natural. Os modelos paramétricos compreendem a orientação dos vãos, a área de janela, as condições de sombreamento aplicadas às janelas, o tipo de vidro (Figura 4.5). Deste modo é possível estabelecer quais os parâmetros mais adequados para a economia de energia a partir do aproveitamento da luz natural.

**Orientação.** Para o estudo da influência da orientação dos vãos envidraçados no comportamento da luz natural, simula-se com a fachada orientada segundo os diferentes pontos cardeais, Norte, Sul, Este e Oeste. Este estudo é realizado apenas para o clima da região de Lisboa, por ser uma região onde a radiação solar tem um forte impacto no desempenho térmico e lumínico dos edifícios.

Ao longo da discussão de resultados é usado os seguintes acrónimos de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: N (Norte), S (Sul), E (Este) e O (Oeste).

**Área da janela.** Para a análise da influência da luz natural e do consumo de energia com relação à dimensão das áreas de janela, são estabelecidas razões de abertura. São simulados casos com  $A_j$  (relação entre a área de janela e a área da parede da envolvente exterior) igual a 0.30, 0.60 e 0.90, ou seja, a área da janela corresponde, respetivamente, a 30%, 60% e 90% da área da parede. Para valores de percentagem intermédios aos utilizados nas simulações, o consumo energético pode ser obtido por interpolação linear. Assim, é possível, de forma aproximada, determinar a área ideal de janela, ou seja, a que trará melhor desempenho lumínico assim como energético para estudo futuros. Para todos os modelos é adoptada uma janela em fita com largura padrão de 7,6m. E para o ajuste do  $A_j$  varia-se apenas a altura da janela

## 4.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

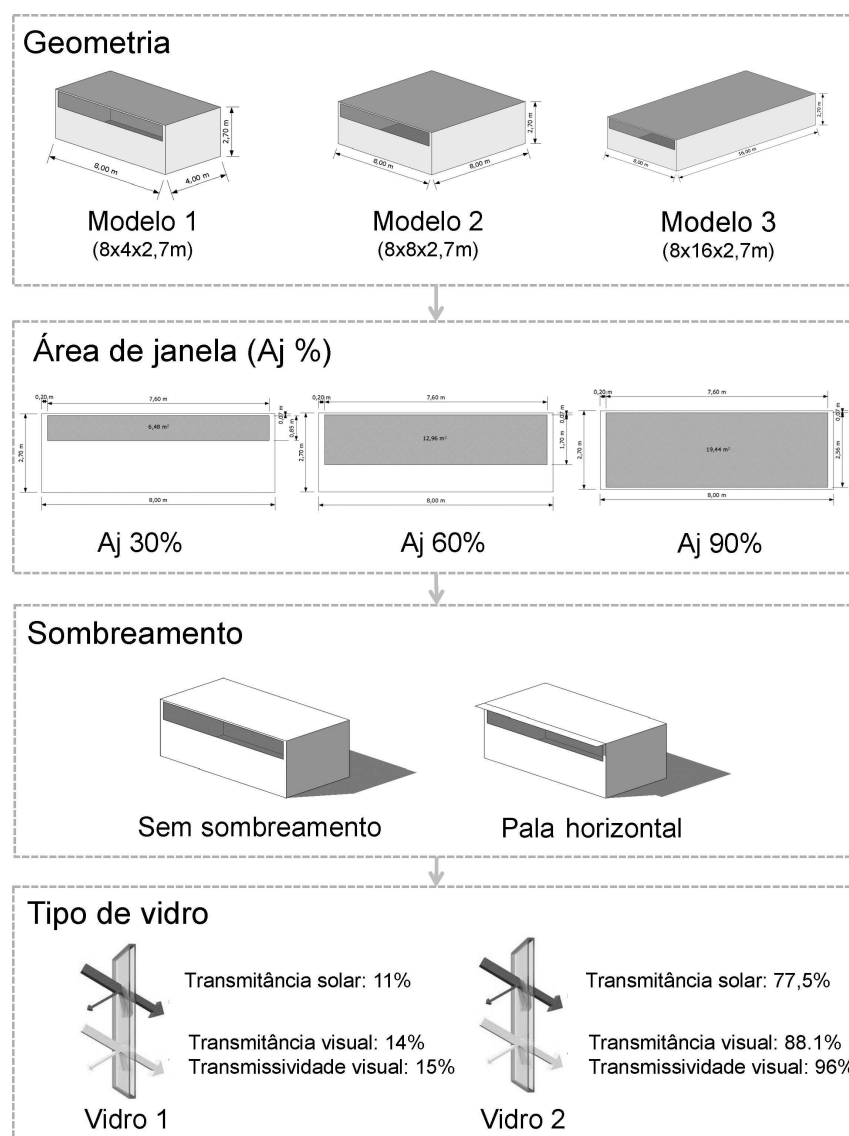


Figura 4.5: Modelos paramétricos, 108 casos diferentes.

(Figura 4.6).

Ao longo da discussão de resultados é usado os seguintes acrónimos de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: Aj30 (área de janela de 30%), Aj60 (área de janela de 60%) e Aj90 (área de janela de 90%).

**Tipo de vidro.** São analisados dois tipos de vidro simples. Pretende-se comparar a quantidade de radiação solar que passa através destes, como também a luz visível que os atravessa. De modo a poder avaliar a disponibilidade da luz natural e consequentemente influência na economia de energia.

São vidros incolores simples com uma espessura de 6mm, mas com transmissividades diferentes, o Vidro1 (V1) que corresponde a um vidro com baixa parcela de luz transmitida e o Vidro2 (V2) com alta parcela de luz. As propriedades dos vidros são retiradas da biblioteca do E+ (Quadro 4.10).

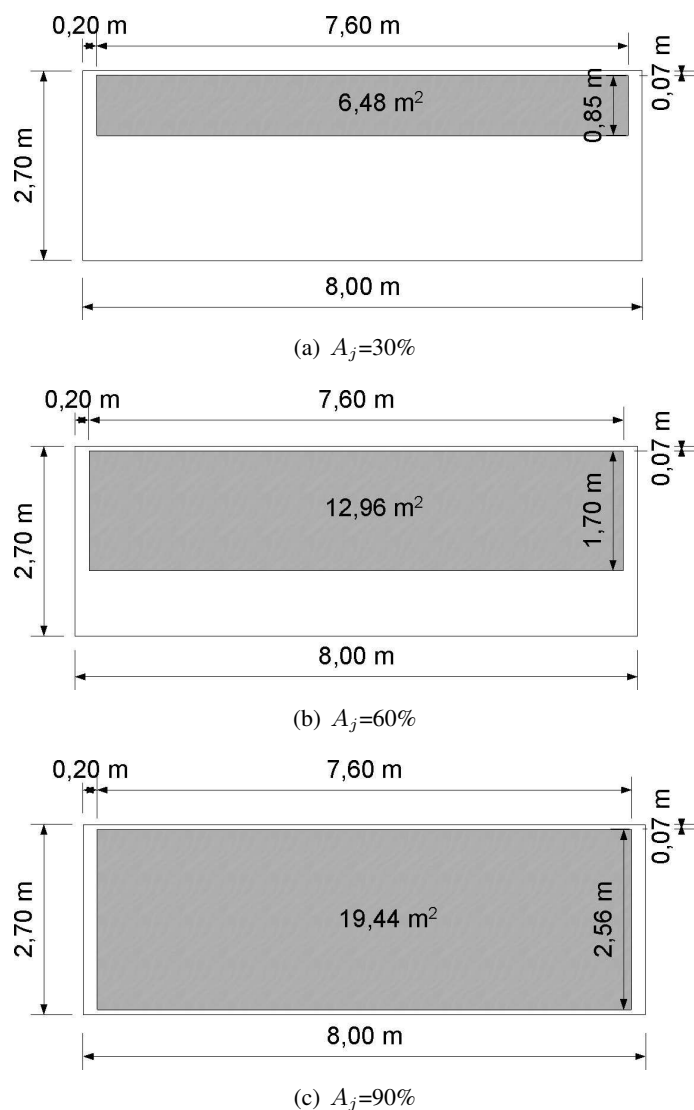


Figura 4.6: Dimensões das janelas.

Quadro 4.10: Propriedades dos vidros (Energy, s.d.).

Vidro	Espessura (m)	Solar			Visível			Condutibilidade (W/m.C)
		Transm.	Reflet. (frente)	Reflet. (atrás)	Transm.	Reflet. (frente)	Reflet. (atrás)	
Vidro 1 (escuro)	0,006	0,110	0,270	0,430	0,140	0,310	0,350	0,90
Vidro 2 (claro)	0,006	0,775	0,071	0,071	0,881	0,080	0,080	0,90

Como o *Daysim* simula a iluminação através do *Radiance*, o seu manual sugere alguns dados de entrada que devem ser inseridos de acordo com algumas características. Ao definir as propriedades ópticas do vidro no *Daysim* é necessário achar a transmissividade ( $t_n$ ) através da transmitância visível ( $T_n$ ) (Equação 4.1). Transmissividade é a quantidade de luz que não é absorvida, enquanto que a transmitância, que é o valor mais comum na bibliografia, é o total de luz transmitida pelo pano incluindo reflexões (s.a.,

## 4.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

1999).

$$t_n = \frac{\sqrt{0,8402528435 + 0,0072522239 * T_n * T_n - 0,9166530661}}{0,0036261119} / T_n \quad (4.1)$$

Vidro 1

Tn= 0.14  
tn= 0.1527

Dados inserir no Daysim:  
0 0 3 0.1527 0.1527 0.1527

Vidro 2

Tn= 0.881  
tn= 0.9595

Dados inserir no Daysim:  
0 0 3 0.9595 0.9595 0.9595

Ao longo da discussão de resultados é usado os seguintes acrónimos de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: V1 (vidro 1, escuro) e V2 (vidro 2, claro).

**Condições de sombreamento.** Para a análise das variações dos elementos de protecção solar, são simulados 2 casos: um sem elementos de protecção solar e outro com elementos de protecção solar. A protecção solar é formada por placas horizontais de reflectância de 50%, com 50cm, 100cm, 140cm x largura do modelo para as  $A_j$ 30, 60, 90% respectivamente (Figura 4.7). No Apêndice D encontra-se descrito o método de dimensionamento das mesmas.

O objetivo deste parâmetro é comparar o desempenho térmico e visual destes sistemas com o caso de ausência de qualquer dispositivo.

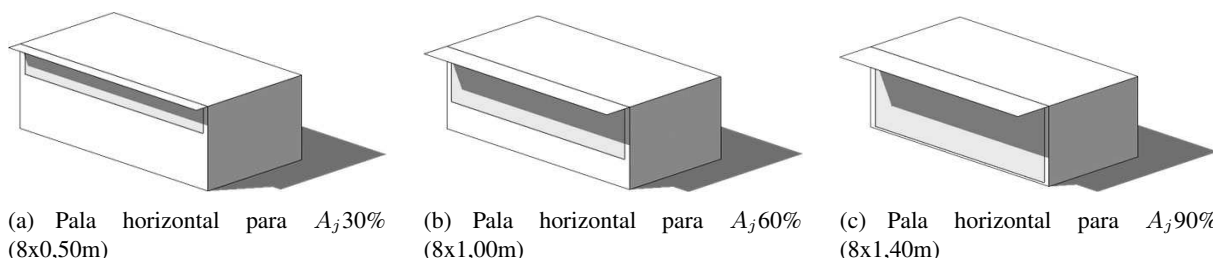


Figura 4.7: Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para área de janela de 30, 60 e 90 no período otimizado 21/03 a 23/09.

Ao longo da discussão de resultados é usado os seguintes acrónimos de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: Ph (pala horizontal). Os modelos sem pala não têm qualquer referência a este parâmetro.

### Modelo base

O principal objectivo de se ter adoptado um conjunto de Modelos base (MB) é para poder ter uma referência simples de comparação directa entre os modelos paramétricos. Para além disso como é

necessário fazer várias alterações aos modelos base, torna-se mais fácil, ao nível dos programas E+, realizá-las sobre um modelo de estudo simples. De forma a ter maior contraste noção dos vários casos simulados, optou-se por um protótipo que representasse uma baixa eficiência energética. O modelo apresenta um sistema de iluminação artificial ligado de acordo com perfil de iluminação do RSECE (Apêndice C), sem sensores fotoelétricos *dimmerizáveis*, o  $A_j$  de 90%, Vidro 2 (claro) e sem qualquer sombreamento (Didoné, 2009). Para cada um dos três modelos é construído um modelo base (Quadro 4.11).

Quadro 4.11: Características do Modelo base.

Modelo Base	Profundidade (m)	Pé direito (m)	$A_j$ (%)	Tipo de vidro
MB1	4	2,70	90	V2 (claro)
MB2	8	2,70	90	V2 (claro)
MB3	16	2,70	90	V2 (claro)

Estes são simulados nas 4 orientações em estudo (Norte, Sul, Este e Oeste), totalizando 12 simulações.

Ao longo da discussão de resultados é usado os seguintes acrónimos de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: MB1 (Modelo base 1, 8x4x2,7m), MB2 (Modelo base 2 8x8x2,7m) e MB3 (Modelo base 3 8x16x2,7m).

### 4.3 Simulações computacionais

As simulações são divididas em três fases. A primeira, que consiste na simulação da iluminação natural nos vários modelos paramétricos através da ferramenta *Daysim*; de seguida a simulação termo-energética dos modelos base com recurso à ferramenta E+; e por fim, a simulação integrada dos modelos paramétricos no E+ com a integração dos dados da primeira fase.

#### 4.3.1 Simulação da iluminação natural

As simulações de iluminação natural são levadas a cabo pelo programa de simulação *Daysim* versão 2.1, que fornece dados para avaliação da luz natural e com o algoritmo *Lightswitch*, dados horários da ativação da iluminação artificial pelo controle automatizado.

Com o auxílio das ferramentas descritas na Secção 3.5 é possível criar os modelos computacionais. Após inserir os modelos no *Daysim* é necessário proceder a algumas configurações (Quadro 4.12)

No final de cada simulação o *Daysim* produz um relatório que fornece dados para a avaliação da luz natural para cada ponto da grelha e um relatório CSV (*Comma Separated Value*), que indica o consumo da iluminação artificial quando a luz natural não atinge os 500 *lx* (Apêndice B). Este relatório é integrado no E+ na forma de *schedule* em base horária de funcionamento da iluminação artificial, com valores entre

### 4.3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Quadro 4.12: Dados de entrada para modelos *Daysim* (Reinhart, 2010).

Ambient bounces	Ambient divisions	Ambient super-samples	Ambient (%)	Ambient resolution	Direct thershold	Direct sampling
5	1000	20	0,1	300	0	0

$0W/m^2$  (o nível de potência instalada em que a iluminação artificial é desligada, ou seja, a iluminação natural satisfaz o nível de iluminância) e  $7W/m^2$  (a iluminação artificial é ligada na potência máxima). Os valores intermédios utilizam a integração entre a iluminação natural e a artificial, sendo a potência desta última regulada de maneira a garantir o nível de iluminância mínimo de  $500 lx$ .

#### Plano de análise

De modo a obter *Daylight Autonomy* (DA) no plano de trabalho é criada uma grelha de pontos suficiente para obter uma boa amostra sem comprometer o poder computacional. A grelha de pontos é uma superfície horizontal situada a 0,80m do piso, esta representa o plano de trabalho onde se pretende que seja iluminada por luz natural. Os sensores estão distribuídos de 0,50m em 0,50m. A quantidade de pontos da malha varia proporcionalmente com o tamanho do ambiente em estudo.

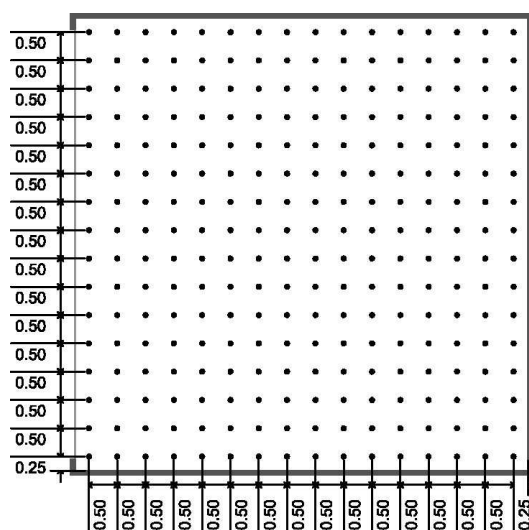


Figura 4.8: Exemplo de grelha de pontos do plano de trabalho para o M2.

#### 4.3.2 Simulação termo-energética

A simulação termo-energética dos modelos base é obtida com o recurso ao programa *EnergyPlus* versão 7.1. Os resultados obtidos permitem a realização dos estudos paramétricos para avaliação comparativa dos modelos.

### 4.3.3 Simulação energética integrada

A simulação termo-energética é realizada com o recurso ao programa *EnergyPlus* versão 7.1 que permite obter os dados referentes ao consumo energético de cada caso de estudo. Os consumos energéticos com a integração do relatório CSV gerado pelo *Daysim*, têm em conta a influência da luz natural, sendo possível avaliar o impacto na economia de energia a partir do seu aproveitamento.

A integração da iluminação natural e artificial é realizada através da *schedule* de controlo da iluminação artificial proveniente das simulações no *Daysim*. Essa *schedule* é inserida como dado de entrada no E+. Desta forma, a densidade de potência em iluminação é dimmerizável conforme a disponibilidade da iluminação natural.

Ao contrário das simulações termo-energéticas que desprezam o efeito da luz natural por terem uma densidade de iluminação constante de  $7W/m^2$  e que o seu funcionamento se resume a intervalos horários com 0(desligado) e 1(ligado) conforme o perfil nominal do RSECE. Já as simulações integradas têm uma potência instalada variável por intervalos horários, para tal no E+ na definição da densidade de iluminação passa a ter uma potência instalada unitária ( $1W/m^2$ ) que funciona entre  $0W/m^2$ (desligado) e  $7W/m^2$ (ligado).

A *schedule* deve ser inserida como se mostra na Figura 4.9.

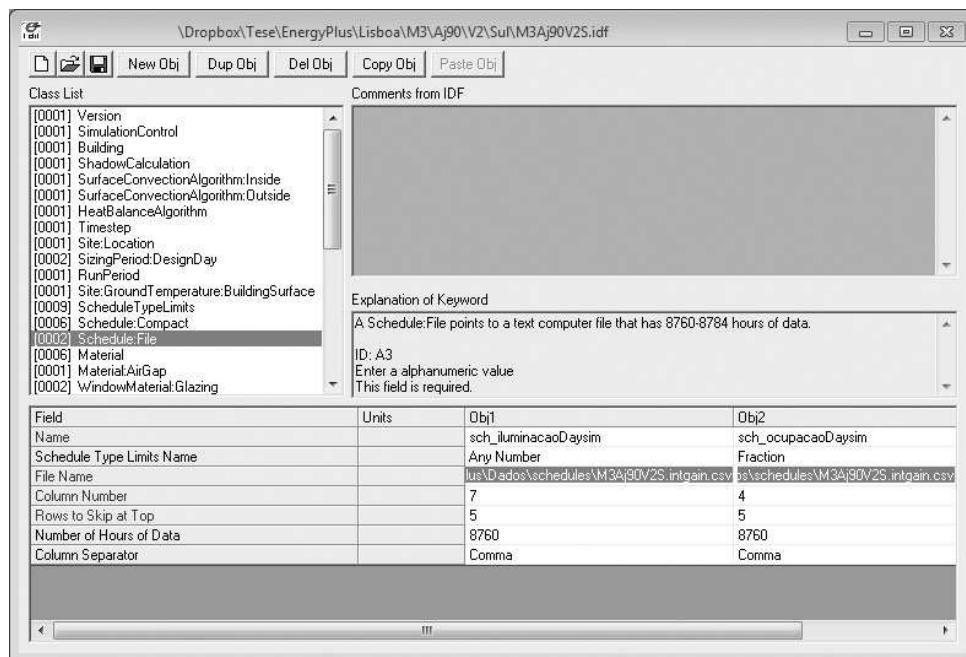


Figura 4.9: Configuração do *EnergyPlus* para receber o relatório “.csv” do *Daysim*.

### 4.3.4 Arquivos climáticos

Para descrever o comportamento térmico e da iluminação natural dentro de um edifício ao longo do ano é necessário saber a quantidade de radiação solar, entre outras variáveis do local. Este tipo de informação é

### 4.3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

fornecida na forma *Test Reference Years (TRY)*. Os arquivos de referência TRY incluem variáveis como: mês, dia e hora; temperatura de bulbo seco e bulbo húmido; velocidade dos ventos, temperatura do solo; pressão barométrica; tipo de céu e radiação solar.

Os intervalos de registo dos dados são intervalos de uma hora, esta é a unidade padrão para simulações térmicas anuais, no entanto para simulação anual da iluminação natural é demasiado grande. A razão é que para uma simulação térmica numa hora não interessa se os ganhos solares de  $600 \text{ Wm}^{-2}$  são alcançados por 30 minutos de  $200 \text{ Wm}^{-2}$  (céu nublado) seguidos de 30 minutos de  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  (céu limpo) ou de num tipo de céu médio  $600 \text{ Wm}^{-2}$  (Reinhart, 2010). Para a simulação da luz natural estas diferenças de céu causam grande impacto, pois um tipo de céu limpo pode causar ofuscamento no plano de trabalho e um tipo de céu nublado pode accionar a iluminação eléctrica. *Daysim* interpela os dados horários em sub-horários de forma proporcional podendo simular em intervalos de 5 minutos, sendo este o mínimo recomendado.

A fonte onde se podem encontrar ficheiros TRYs é no site *US Department of Energy's* (<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata.html>). O site disponibiliza ficheiros climáticos horários para mais de 660 locais no formato *EnergyPlus Weather File (EPW)*. O *Daysim* importa os ficheiros EPW e extrai a informação necessária para uma simulação anual da iluminação natural (Reinhart, 2010).

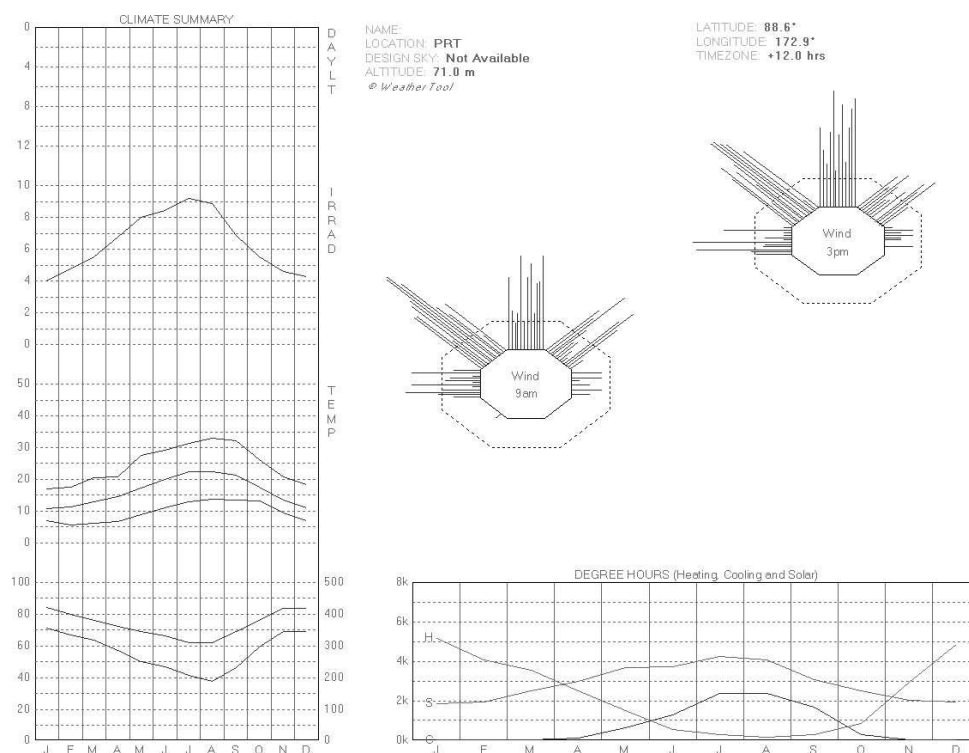


Figura 4.10: Dados mensais no ficheiro climático de Lisboa.

Em ambos os programas é usado o ficheiro climático de Lisboa.

#### 4.4 Critérios de avaliação do desempenho energético e visual

Optimizar os parâmetros que regulam a quantidade e qualidade de luz natural é importante como referido anteriormente, influenciam o consumo energético com a luz artificial, enquanto a radiação solar afecta os sistemas de aquecimento e arrefecimento.

Em Portugal existe muito pouca ou nenhuma investigação nos parâmetros mínimos aceitáveis usando medidas dinâmicas de avaliação da luz natural. Deste modo são aplicados critérios desenvolvidos pelo movimento *Collaborative for High Performance Schools* (CHPS) (Corporation, 2006). Os critérios de iluminação natural propostos pela CHPS pretendem incentivar a optimização de iluminação natural com as condições climáticas locais nos estabelecimentos de ensino. Embora seja direccionado para estabelecimentos de ensino a sua aplicação em escritórios é igualmente válida devido às semelhanças da actividade desenvolvida.

A optimização do desempenho visual e energético dos vários escritórios é realizada usando os critérios do Quadro 4.13. Os critérios de avaliação do consumo de energia incluem mínimo consumo de aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação artificial. A iluminância é escolhido como um indicador quantitativo da qualidade de luz para os aspectos visuais. Em relação às medidas qualitativas para o conforto visual, dois tipos de critérios são testados. O primeiro é a uniformidade (60% da área com iluminância de  $500lx$  durante 40% do tempo). O segundo é avaliação do brilho ou fontes de luz intensas, através do DAMax.

*Quadro 4.13:* Resumo dos critérios aplicados (Adaptado de Corporation, 2006, Ochoa *et al.*, 2012).

Tipo de aspectos	Critério	Unidade	Valores aceitáveis
Energético	Desempenho Consumo total (iluminação artificial, ventilação e ar-condicionado)	$KWh/m^2$	Menor consumo de energia dos casos estudados
Visual	Quantidade de luz	Horas que a iluminância é maior ou igual $500lx$	– 40% do tempo durante o período de ocupação
	Conforto	Uniformidade Probabilidade ocorrência de brilho	– 60% da área com mínimo de 40% de DA – 5% da área com máximo de DAMax (1 - 100%)

Os critérios de aceitação utilizando simulações dinâmicas são detalhados a seguir:

- O consumo total anual deve ser minimizado. O consumo com a iluminação artificial é usado para relacionar o consumo total de energia com os critérios visuais. O limite inferior é o consumo mínimo para todos os modelos, e o limite superior é a região crítica em que a luz do dia não contribui para a poupança de iluminação artificial (Johnson *et al.*, 1984).
- Quantidade de luz do dia deve ser igual ou superior a  $500lx$  de iluminância. O DA deve ser superior a 40% do tempo para um crédito, 60% para dois e 80% para três créditos durante o período de ocupação.
- Uniformidade requer que no mínimo em 60% da área do plano de trabalho seja alcançado os limites de quantidade de luz do dia referidos no ponto anterior.

#### 4.5. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

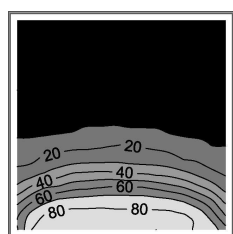
- Brilho, o espaço não deve exceder o limiar de 1% DAm<sub>ax</sub> para 5% da área do plano de trabalho.
- Para esta pesquisa cumprindo critérios de quantidade de luz e um dos critérios visuais (uniformidade ou brilho) é considerado suficiente para aceitar o dispositivo de iluminação natural como adequado.

### 4.5 Processamento e análise dos dados

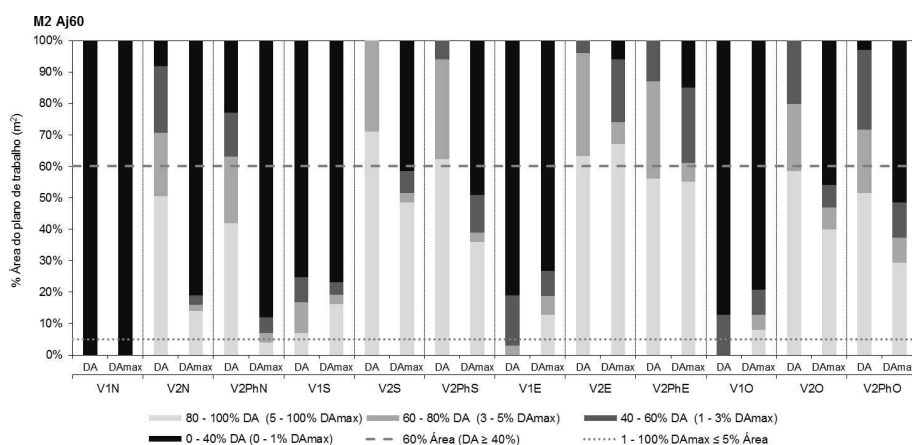
Os dados obtidos com as simulações são tratados e analisados por diferentes temáticas, comportamento da luz natural e potencial de economia de energia eléctrica. Nos dois casos são adoptados métodos gráficos e correlações numéricas que permitem adoptar uma abordagem quantitativa para avaliar numericamente a contribuição da luz natural na visualização do consumo de energia eléctrica, como relacionar o consumo com diversos parâmetros avaliados.

#### 4.5.1 Comportamento da luz natural

Para cada caso simulado no *Daysim* é solicitado um relatório que apresenta vários dados de iluminação natural entre os quais *Daylight Autonomy* (DA) e *Daylight Autonomy maximum* (DA<sub>max</sub>) em cada ponto da malha de medição. De forma a ter uma percepção visual do resultado final da iluminação e da tendência de distribuição do fluxo luminoso pelas áreas dos ambientes, os valores de DA são sistematizados com o programa *Surfer* versão 10 em gráficos de curvas *Iso Daylight Autonomy* (isoDA) dos diferentes casos no plano de trabalho. Os gráficos isoDa são mapas de curvas de cores falsas com o mesmo DA (Figura 4.11(a)). Desta forma pode-se identificar o comportamento da iluminação natural e conhecer os diferentes valores de DA por metro quadrado ( $m^2$ ) nos espaços delimitados pelas curvas.



(a) Gráfico de curva isoDa



(b) Distribuição DA e DA<sub>max</sub> por % área ocupada

Figura 4.11: Método gráfico para análise do comportamento da iluminação natural.

Os gráficos da Figura 4.11(b) apresentam a relação entre o DA o DA<sub>max</sub> e a distribuição percentual no

plano de trabalho. As colunas empilhadas representam a % de área de DA e DAmáx enquanto as linhas horizontais representam limites de aceitação dos critérios visuais.

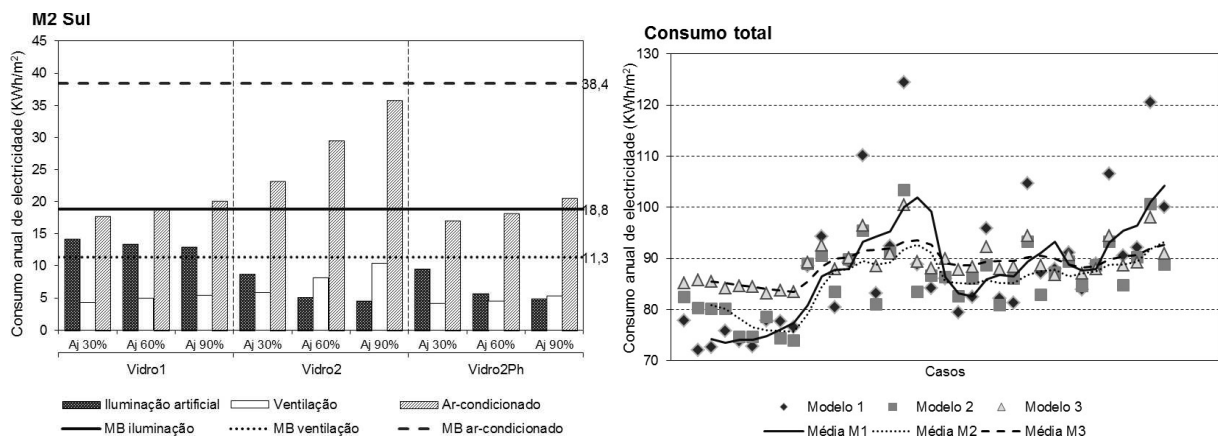
Ao longo da discussão de resultados é usada as seguintes definições de modo a facilitar e tornar a discussão mais concisa: DA1=40%–60% de DA, DA2=60%–80% de DA e DA3=80%–100% de DA.

### 4.5.2 Potencial de economia de energia eléctrica

Nas simulações termo-energéticas e simulações integradas é solicitado no E+ o consumo estimado de electricidade anual ( $KWh/m^2$ ), para cada caso.

Todos os dados provenientes das simulações são sistematizados em quadros. A partir dos consumos totais anuais de electricidade é possível traçar gráficos de orientação do envidraçado e de área de janela (30% a 90%) *versus* consumo de electricidade, separado por uso final e por consumo total (Figura 4.12(a)). Os gráficos apresentam também relações entre o consumo de energia dos modelos base com os modelos paramétricos, onde as colunas representam os valores de consumo obtido com as simulações integradas dos modelos com diferentes parâmetros e as linhas representam os valores de consumo obtido com as simulações termo-energéticas do MB.

As análises são organizadas por grupos e entre os modelos com o intuito de salientar a influência da luz natural no consumo de energia.



(a) Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final. (b) Consumo estimado de energia eléctrica total relacionado com diferentes volumetrias.

Figura 4.12: Método gráfico potencial de economia de energia eléctrica.

Para além do método gráfico de comparação, é calculada a percentagem do possível potencial de economia de energia eléctrica (Equação 4.2). Deste modo estima-se com maior precisão a economia de energia provocada pelo aproveitamento da iluminação natural.

$$RC_i = \left(1 - \frac{M_i}{MB_i}\right) * 100 \quad (4.2)$$

#### 4.5. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Onde:

$RC_i$  é a redução no consumo de energia eléctrica entre os casos de estudo (%);

$MB_i$  é o consumo de eletricidade para o modelo tido como base ( $kWh/m^2$ );

$M_i$  é o consumo de eletricidade para o modelo a ser comparado com o base ( $kWh/m^2$ ).

#### 4.5.3 Avaliação do desempenho energético e visual

O consumo de energia é representado em gráficos de barras sobrepostos com a iluminação artificial, ventilação e ar-condicionado (Figura 4.13). As linhas de quantidade de luz e de conforto visual representam a percentagem de área do plano de trabalho que satisfaz os critérios de iluminância, uniformidade e brilho. O método de optimização gráfico utilizado é adaptado de Ochoa *et al.* (2012). Qualquer ponto da linha ( $\% \text{Área DA} \geq 40\% \text{ DA}$ ) acima de 60% corresponde ao cumprimento do critério de iluminância e uniformidade, a linha ( $\% \text{Área DAmax} \geq 1\% \text{ DAmax}$ ) dita o critério do brilho, em que qualquer ponto acima de 5% da área do plano de trabalho é susceptível de brilho.

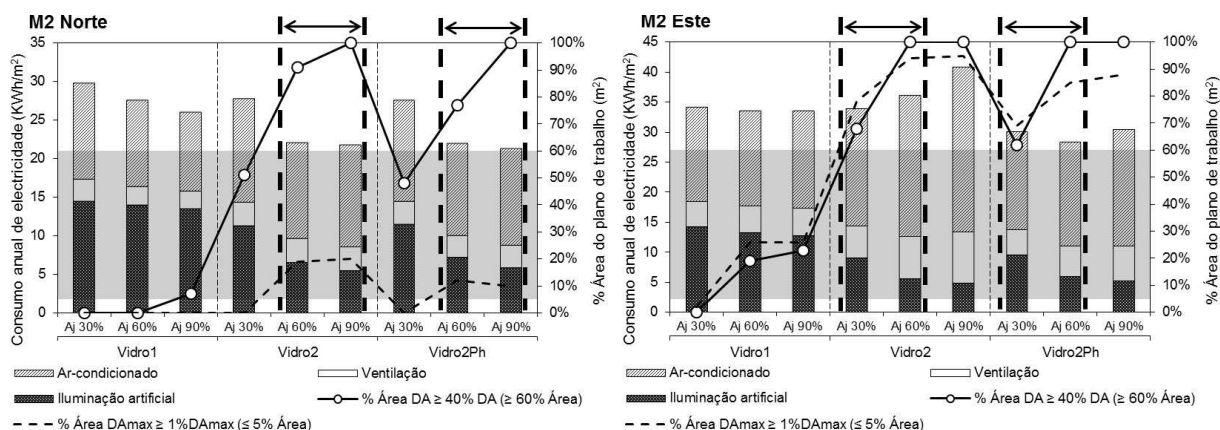


Figura 4.13: avaliação do desempenho energético e visual.

Os resultados obtidos da análise gráfica só são válidos para escritórios com as mesmas características, dimensões e para a zona climática de Lisboa.



## Capítulo 5

# Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados e respetivas análises obtidas através das simulações. Inicialmente é analisado o comportamento dinâmico da luz natural nos diferentes modelos em estudo através dos valores de *Daylight Autonomy* (DA) e *Daylight Autonomy maximum* (DAm<sub>ax</sub>) retirados das simulações do programa *Daysim*; Posteriormente é analisado o potencial de economia de energia eléctrica, onde são apresentados os resultados das simulações termoenergéticas e das simulações integradas, do programa *EnergyPlus*, com os modelos base e os modelos de diferentes parâmetros; Na avaliação do desempenho energético e visual é analisado o comportamento dinâmico da luz natural em conjunto com os consumos estimados das simulações termo-energéticas integradas.

### 5.1 Comportamento da luz natural

A análise do comportamento da luz natural nos casos de estudo é efectuada através das medidas dinâmicas *Daylight Autonomy* (DA) e *Daylight Autonomy maximum* (DAm<sub>ax</sub>). O DA indica a percentagem das horas ocupadas por ano, nas quais se pode manter um nível de iluminância de 500 *lx*, recorrendo apenas ao uso da iluminação natural. A análise da luz natural é apresentada de forma gráfica em mapas do plano de trabalho com curvas isoDA *Iso Daylight Autonomy*, onde cada intervalo de DA é representado por uma cor. O DAm<sub>ax</sub> refere-se à percentagem das horas ocupadas por ano, nas quais os níveis de iluminância são 10 vezes maiores que 500 *lx* quantificando as zonas susceptíveis de brilho.

Os resultados estão sintetizados em três grupos de acordo com a sua geometria base (M1, M2 e M3). Cada grupo contém 36 casos diferentes, definidos de acordo com a combinação de quatro variáveis: orientação, tipo de vidro, área de janela e sombreamento horizontal. Em cada grupo há uma discussão preliminar desses resultados.

### 5.1.1 Análise Modelo 1

Na primeira fase de simulações utiliza-se os escritórios denominados por Modelo 1 (M1) com as seguintes dimensões, 8,00m de largura por 4,00m de profundidade e pé direito de 2,70m.

#### Modelo 1 $A_j30$

As Figuras 5.1 a 5.3 resumem os resultados das simulações do Modelo 1 com abertura de janela de 30%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

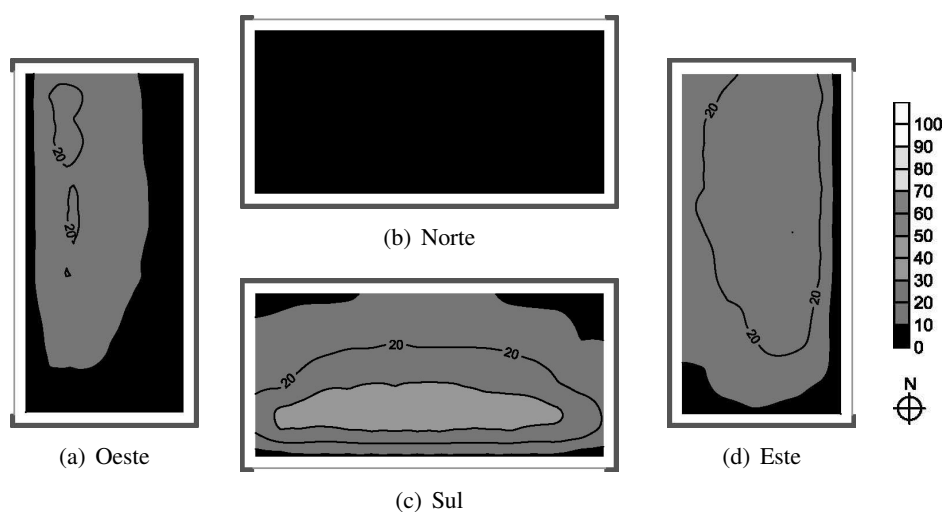


Figura 5.1: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj30V1, nas quatro orientações principais.

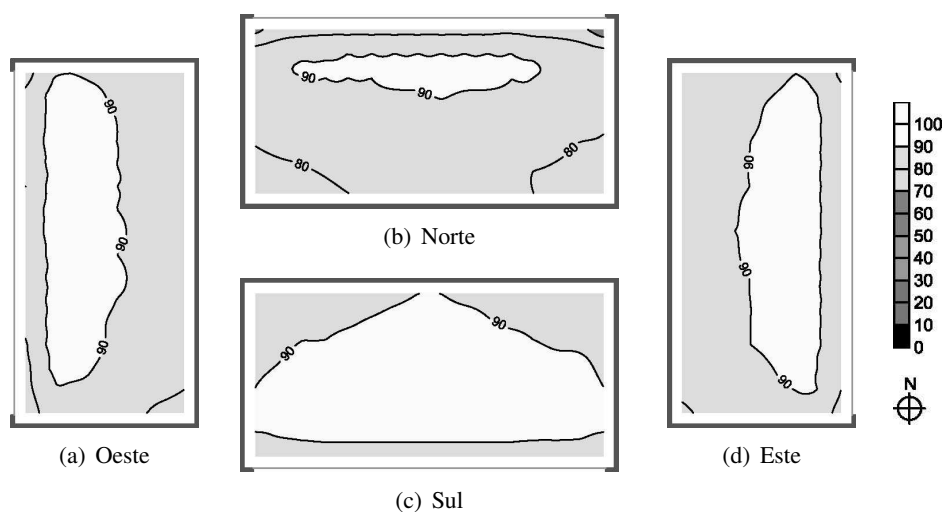


Figura 5.2: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj30V2, nas quatro orientações principais.

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

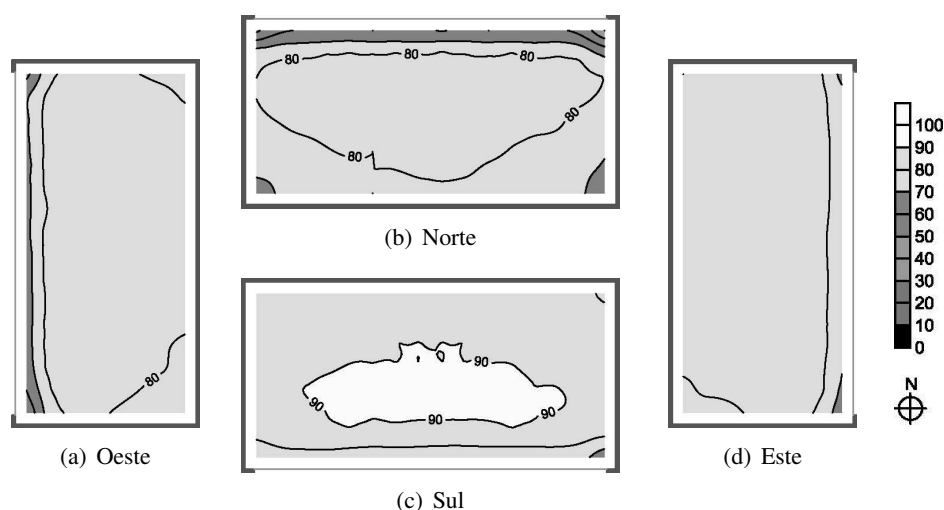


Figura 5.3: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso para a área do escritório M1Aj30V2Ph, nas quatro orientações principais.

A Figura 5.4 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAm<sub>ax</sub>, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

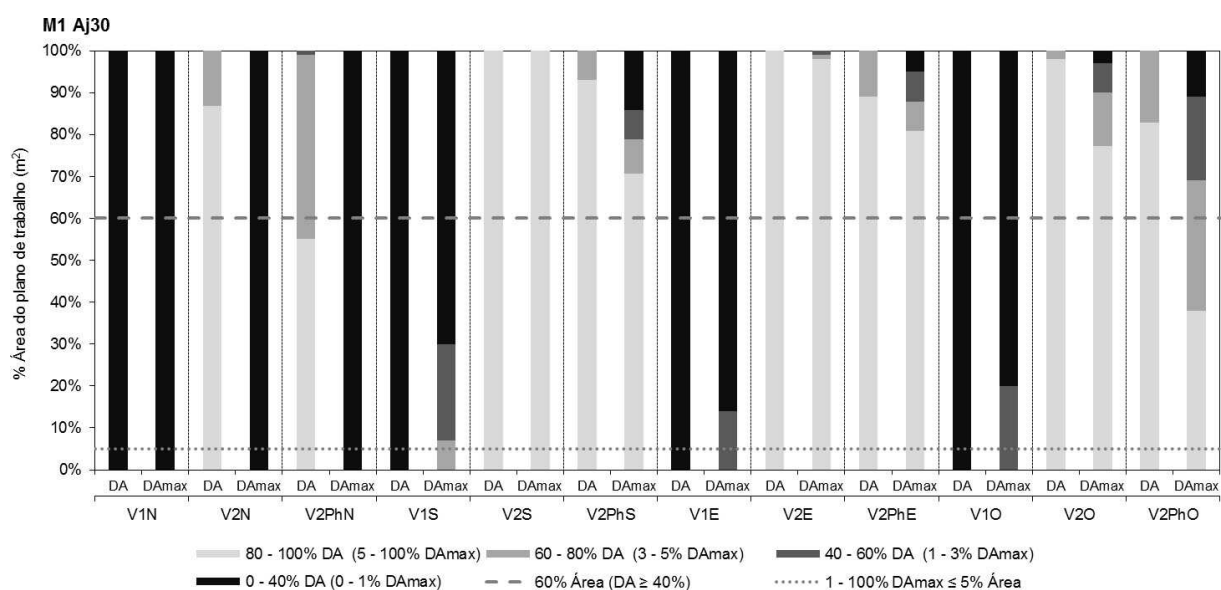


Figura 5.4: Comparação da distribuição do DA e DAm<sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.1 a 5.3.

Através das Figuras 5.1 a 5.4, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M1Aj30. Observa-se que os casos com V1 (vidro escuro) são escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos 500lx de iluminância em 40% do período de ocupação. O comportamento apresentado nos restantes casos em relação à quantidade de luz e uniformidade é boa, indicando DA3 para 60% da área de trabalho.

Observa-se também que nos casos considerados como bem iluminados têm valores altos de DAm<sub>ax</sub> indicando probabilidade de ocorrência de brilho. O limiar de 1% DAm<sub>ax</sub> para mais de 5% da área

de trabalho é excedido em todos os casos excepto no escritório com vidro 2 (claro) orientação Norte, indicando que é necessário melhor controlo da radiação solar directa.

### Modelo 1 Aj30

As Figuras 5.1 a 5.3 resumem os resultados das simulações do Modelo 1 com abertura de janela de 60%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

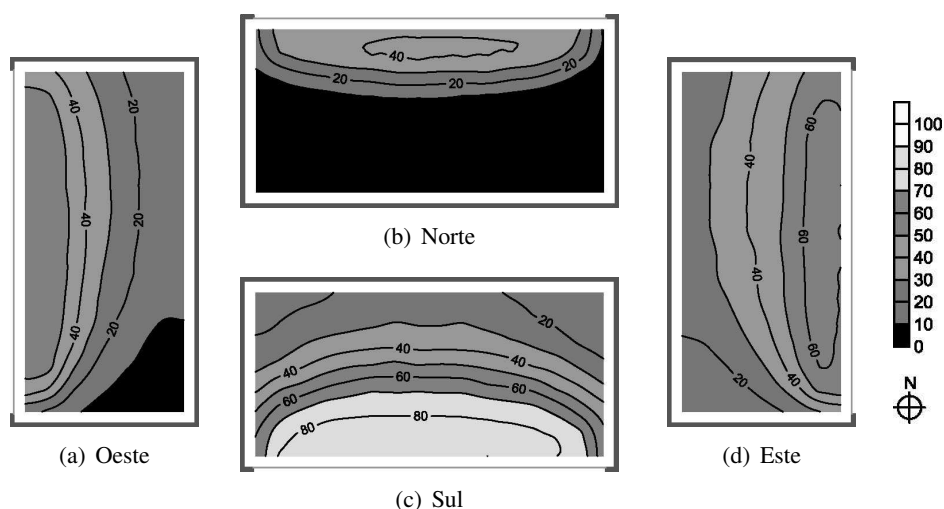


Figura 5.5: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj60V1, nas quatro orientações principais.

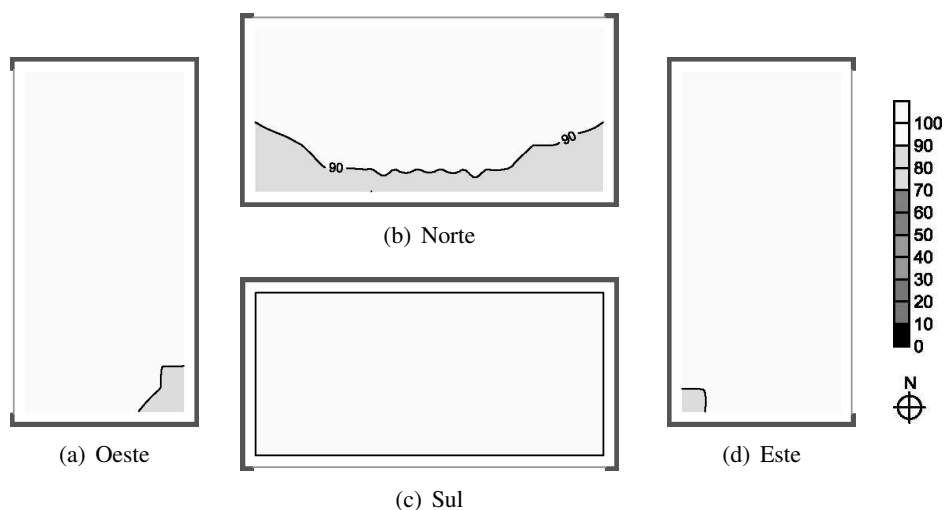


Figura 5.6: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj60V2, nas quatro orientações principais.

A Figura 5.8 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAmáx, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

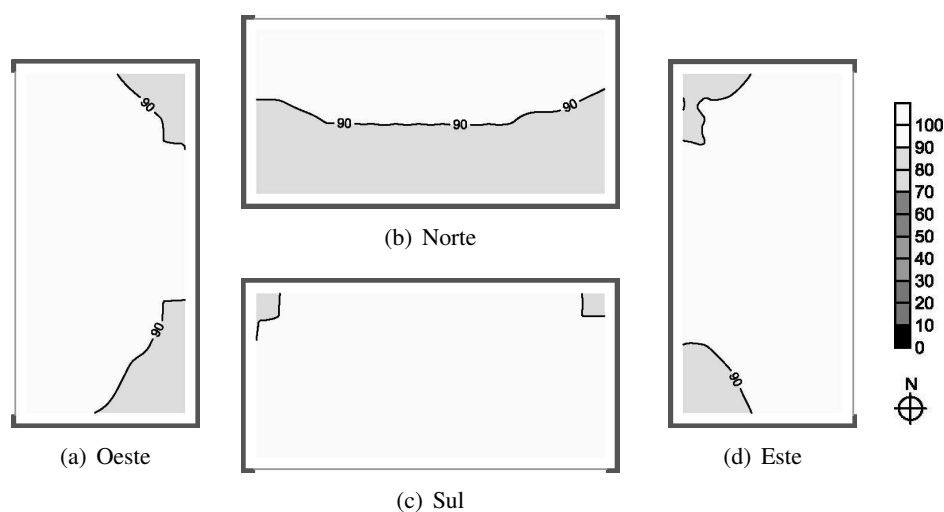


Figura 5.7: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais.

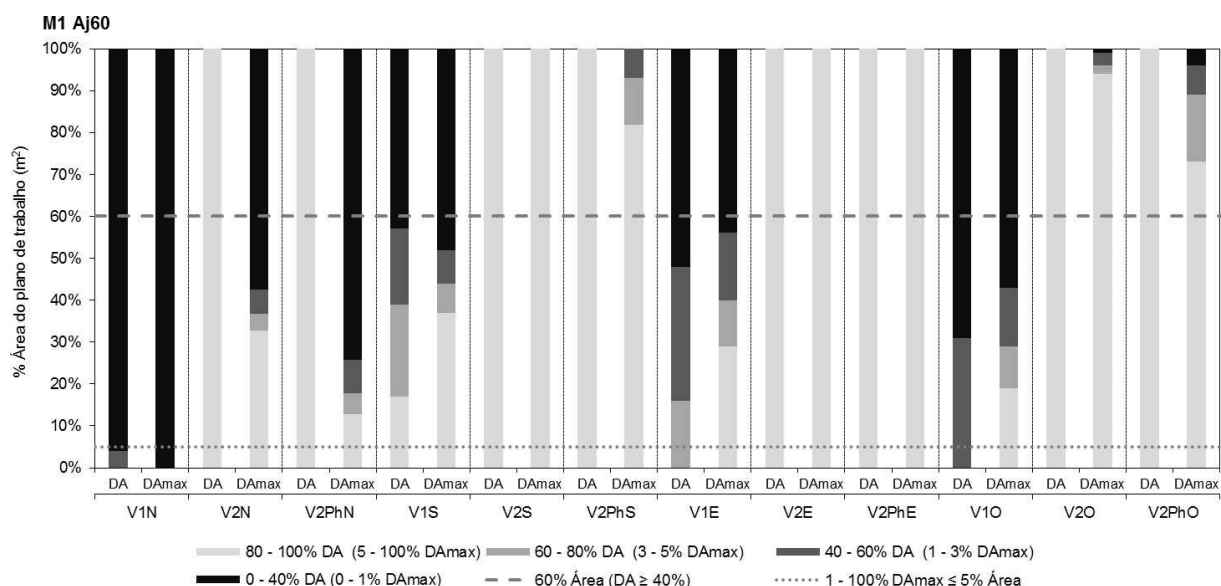


Figura 5.8: Comparação da distribuição do DA e DAmáx nas quatro orientações das Figuras 5.5 a 5.7.

Através das Figuras 5.5 a 5.8, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M1Aj60. Observa-se que aumentando a área de janela para 60% os casos com V1 (vidro escuro) continuam a ser escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos  $500lx$  de iluminância em 40% do período de ocupação. O comportamento apresentado nos restantes casos em relação à quantidade de luz e uniformidade é boa, indicando DA3 para 100% da área de trabalho.

Observa-se também que nos casos considerados como bem iluminados têm valores altos de DAmáx indicando probabilidade de ocorrência de brilho. O limiar de 1% DAmáx para mais de 5% da área de trabalho é excedido em todos os casos, indicando que é necessário melhor controlo da radiação solar directa.

**Modelo 1 Aj30**

As Figuras 5.9 a 5.11 resumem os resultados das simulações do Modelo 1 com abertura de janela de 90%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

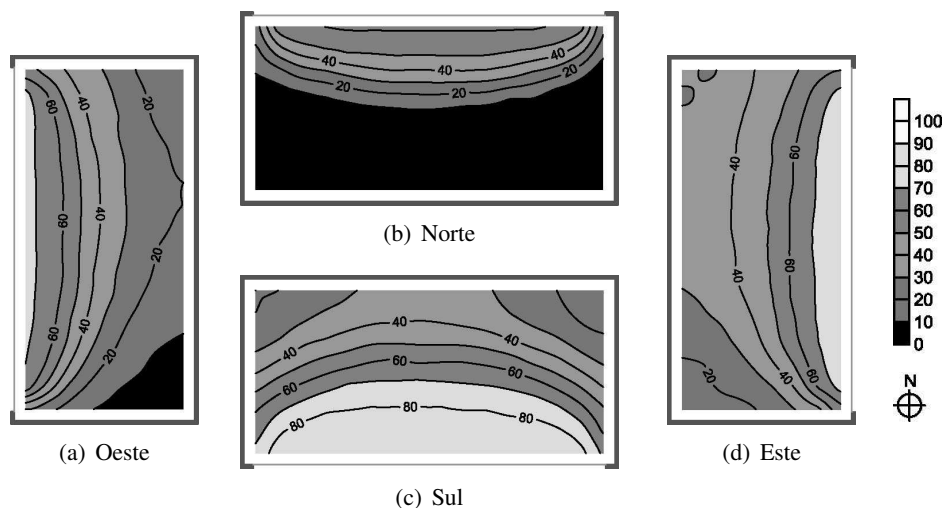


Figura 5.9: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj90V1, nas quatro orientações principais.

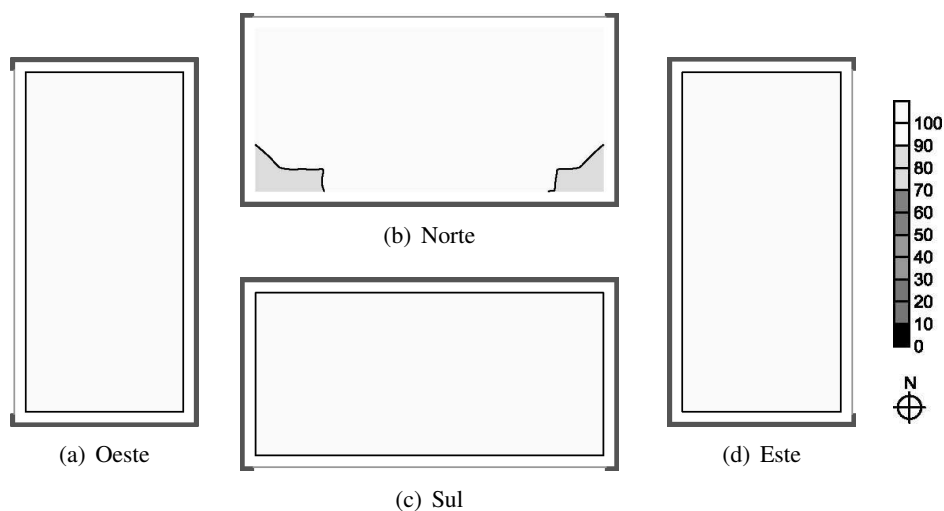


Figura 5.10: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj90V2, nas quatro orientações principais.

A Figura 5.12 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAm<sub>ax</sub>, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

Através das Figuras 5.9 a 5.12, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M1Aj90. Observa-se que o aumento da área de janela para 90% os casos com V1 (vidro escuro) continuam a ser escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos 500lx de iluminância em 40% do período de ocupação, excepto

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

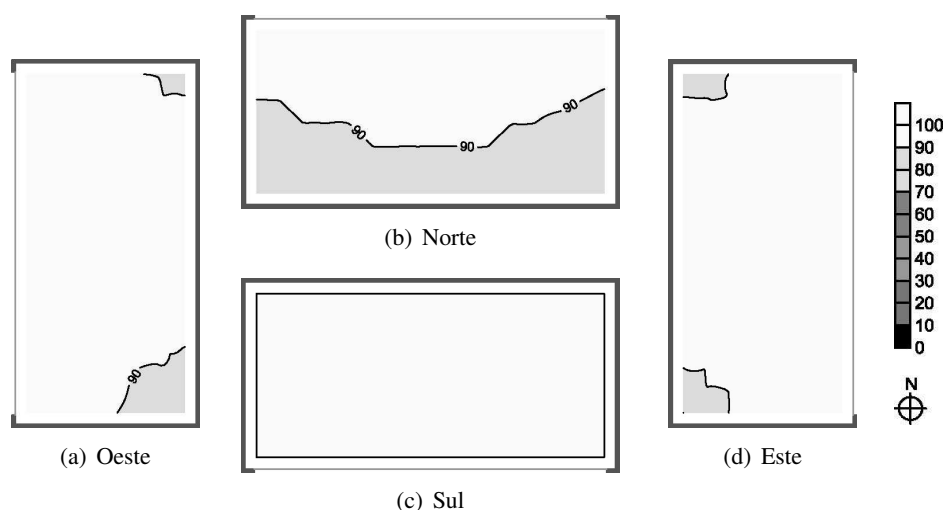


Figura 5.11: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M1Aj90V2Ph, nas quatro orientações principais.

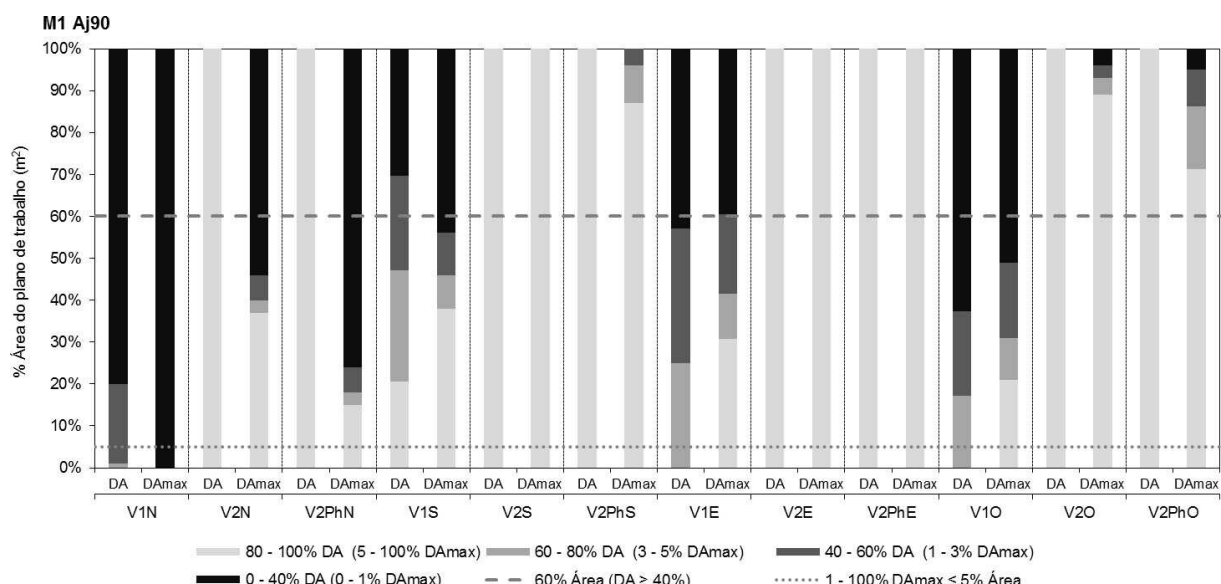


Figura 5.12: Comparação da distribuição do DA e DAmáx nas quatro orientações das Figuras 5.9 a 5.11.

na orientação Sul. O comportamento apresentado nos restantes casos em relação à quantidade de luz e uniformidade é boa, indicando DA3 para 100% da área de trabalho, tal como se verifica no seu homologado de abertura de janela de 60%.

Observa-se também que nos casos considerados como bem iluminados têm valores altos de DAmáx indicando probabilidade de ocorrência de brilho. O limiar de 1% DAmáx para mais de 5% da área de trabalho é excedido em todos os casos, indicando que é necessário melhor controlo da radiação solar directa.

O aumento da abertura de janela para 60% e 90% em nada contribui na quantidade e qualidade da luz interior nos escritórios com profundidade até 4m, este aumento só agrava as condições de conforto no

que toca à probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento.

### Discussão dos resultados (Modelo 1)

Através dos resultados apresentados individualmente do Modelo1 nas situações Aj30 a Aj90, apresenta-se uma análise geral e comparativa entre os resultados, para assim ser possível analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das diferentes variáveis.

**A orientação** é um parâmetro que interfere nos valores de DA e DAMax alcançados. Apesar de haver diferença na profundidade alcançada pela luz natural em todos os escritórios simulados, as orientações Sul, Este e Oeste a diferença de uma orientação para outra é pequena quando comparado com a orientação Norte. Entre as orientações estudadas a fachada Norte é a que apresenta valores mais baixos de DA, por ser a orientação menos exposta à radiação solar directa, devido à posição geográfica e condições atmosféricas da cidade em estudo, tendo um máximo no caso M1Aj90V2N com DA3 em 100% da área e DA2 em 1% da área do mesmo modelo com vidro escuro (Figura 5.10 e 5.9). A orientação Este e Oeste apresentam valores parecidos em quase todos os casos, apresentando valores máximos de DA3 em 100% do plano de trabalho no caso M1Aj90V2E e Oeste (Figura 5.10). A orientação sul é a que apresenta valores mais altos de DA, chegando a um DA3 em 100% da área do plano de trabalho em todos as aberturas de janela com o tipo o vidro2 (vidro claro) ((Figura 5.2, 5.6 e 5.10).

**A protecção solar** é um parâmetro que interfere significativamente no comportamento da luz natural. O uso de palas horizontais, com reflectância de 0.50 permitiu por um lado ambientes menos iluminados mas com maior controlo na ocorrência de brilho, quando comparado com o modelo sem palas. O uso da protecção solar não inibiu o brilho por completo, em todos os casos o limiar de 1% DAMax para mais de 5% da área de trabalho é excedido, indicando que é necessário dispositivos mais eficazes (Figura 5.4, 5.8 e 5.12).

**O tipo de vidro** é um parâmetro que aumenta ou diminui directamente a quantidade de iluminação no interior independentemente das outras variáveis. Os resultados mostram que V2 (vidro claro), proporcionou maiores valores de DA do que o V1 (vidro escuro). O V1 reduziu em mais de 50% a iluminação do escritório. Os casos com V1 (vidro escuro) são escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos 40% de DA, excepto no M1Aj90V1S com DA1 de 23%, DA2 27% e DA3 21% cuja soma ultrapassa o requisito de uniformidade dos 60% do plano de trabalho (5.12). Na maior parte dos casos com V1 não obtiveram luz natural na região mais afastada da janela, chegando no caso M1Aj30V1N a 0% do DA em 100% da área (Figura 5.1).

**A percentagem de área de janela** influencia a quantidade de luz natural disponível no ambiente, já que quanto maior for, maior o valor de DA obtido. Como exemplo, pode-se observar três casos com V1 (vidro escuro) e fachada voltada para Sul, o caso M1Aj30V1S com DA1 em 23% e DA2 em 7% e DA3 0%, M1Aj60V1S com DA1 em 8% DA2 em 7% e DA3 em 37% e o caso M1Aj90V1S com DA1 em 10% DA2 em 8% e DA3 em 38% da área do plano de trabalho. Percebe-se que conforme o tamanho da abertura maior é a percentagem de área com valores mais elevados de DA. Por outro lado nos escritórios com V2 (vidro claro) o aumento da área de janela de 30% em diante em nada contribui na quantidade e qualidade da luz interior. Como os escritórios M1 têm uma profundidade reduzida de 4m, estes atingem os requisitos mínimos de quantidade e uniformidade com alguma facilidade, ora o aumento

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

do envidraçado nesta tipologia só tende agravar as condições de conforto no que toca à probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento (Figura 5.4, 5.8 e 5.12).

Nos Quadros E.1, E.2 e E.3 do Apêndice E estão resumidos os valores das percentagens de área do plano de trabalho com determinado DA e DAmáx nos 36 casos simulados do Modelo 1.

### 5.1.2 Análise Modelo 2

Nesta segunda fase de simulações utiliza-se os escritórios denominados por Modelo 2 (M2) com as seguintes dimensões, 8,00m de largura por 8,00m de profundidade e pé direito de 2,70m. Este conjunto de simulações pretende da mesma forma analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência de diferentes parâmetros, mas num ambiente mais profundo.

#### Modelo 2 Aj30

As Figuras 5.13 a 5.15 resumem os resultados das simulações do Modelo 2 com abertura de janela de 30%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

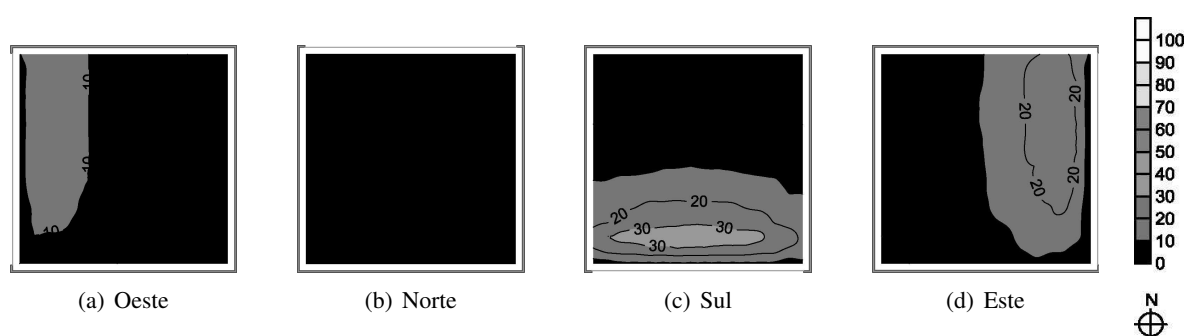


Figura 5.13: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj30V1, nas quatro orientações principais.

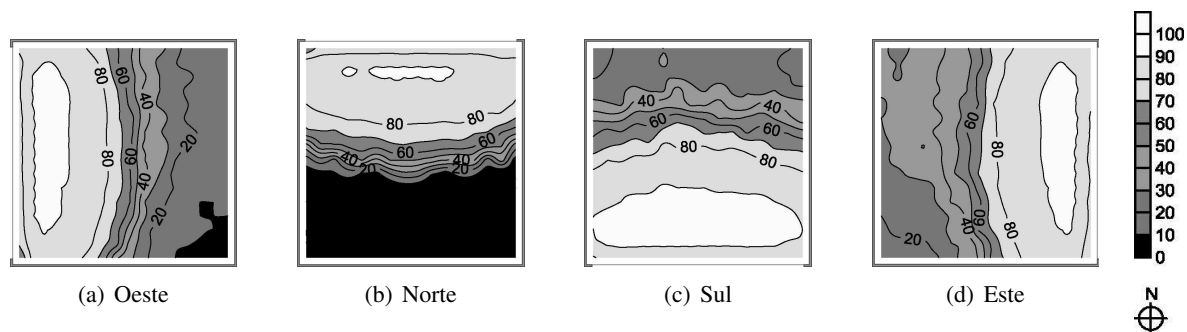


Figura 5.14: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj30V2, nas quatro orientações principais.

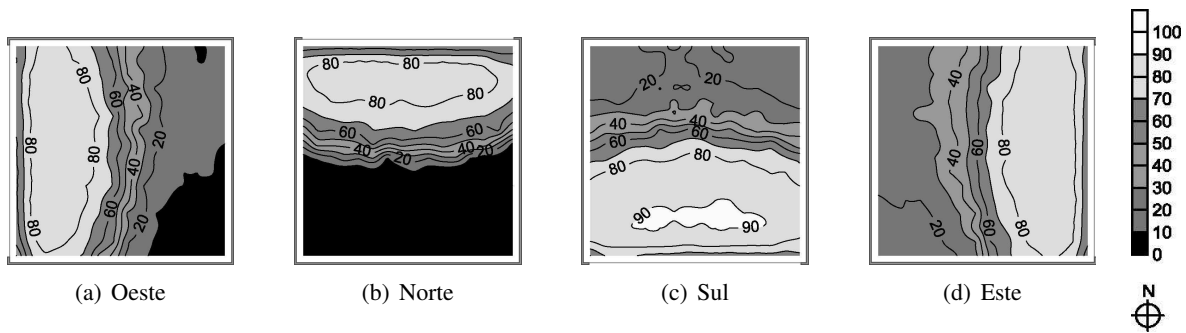


Figura 5.15: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj30V2Ph, nas quatro orientações principais.

A Figura 5.16 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAm<sub>ax</sub>, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

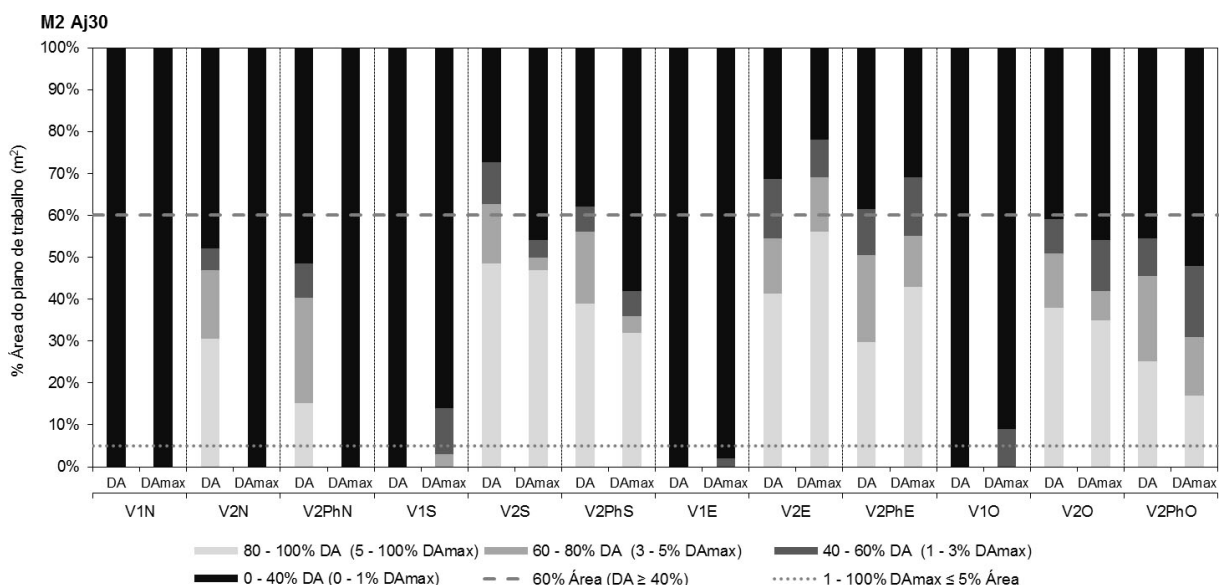


Figura 5.16: Comparação da distribuição do DA e DAm<sub>ax</sub> nas quatro orientações das Figuras 5.13 a 5.15.

Através das Figuras 5.13 a 5.16, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M2Aj30. Observa-se que os casos com V1 (vidro escuro), e os modelos orientados a Norte e Oeste são escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos 500lx de iluminância em 40% do período de ocupação. O comportamento apresentado nos restantes casos em relação à quantidade de luz e uniformidade é boa, indicando DA<sub>1</sub>+DA<sub>2</sub>+DA<sub>3</sub> em 60% da área de trabalho.

Observa-se também que nos casos considerados como bem iluminados têm valores altos de DAm<sub>ax</sub> indicando probabilidade de ocorrência de brilho. O limiar de 1% DAm<sub>ax</sub> para mais de 5% da área de trabalho é excedido em todos os casos.

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

### Modelo 2 Aj30

As Figuras 5.17 a 5.19 resumem os resultados das simulações do Modelo 2 com abertura de janela de 60%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

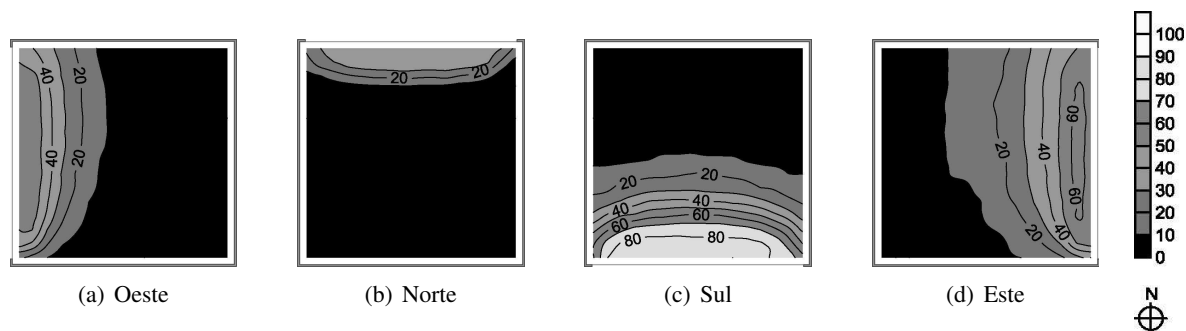


Figura 5.17: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V1, nas quatro orientações principais.

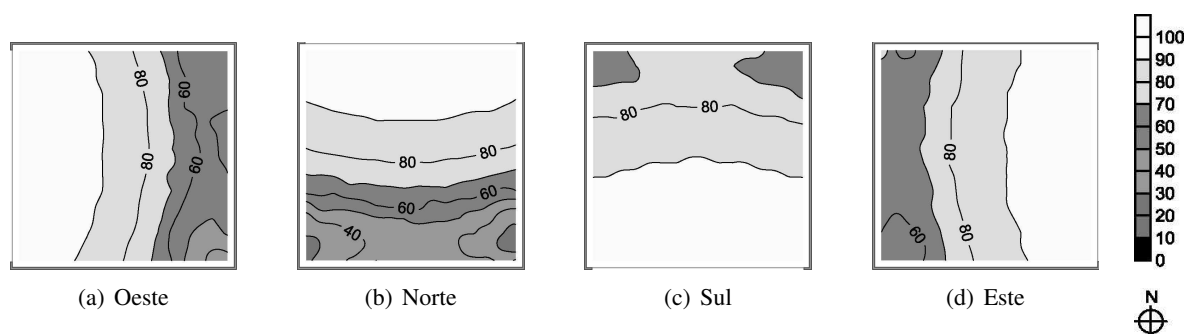


Figura 5.18: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V2, nas quatro orientações principais.

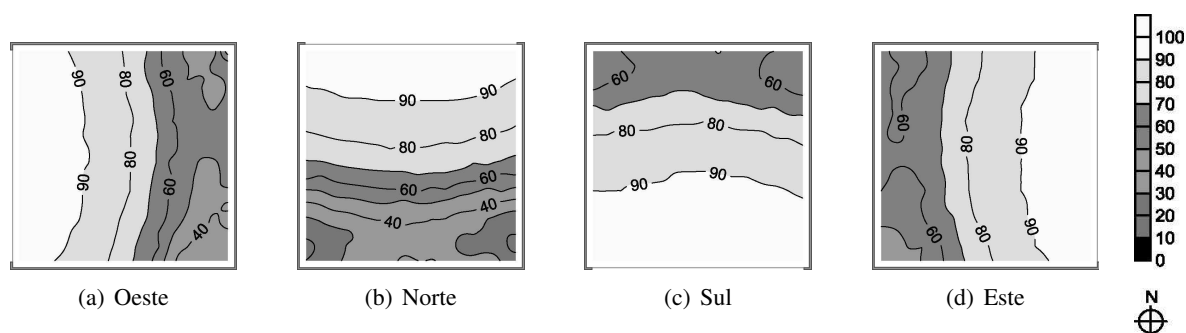


Figura 5.19: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais.

A Figura 5.20 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAMax, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

Através das Figuras 5.17 a 5.20, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M2Aj60. Observa-se que aumentando a área de janela para 60% os

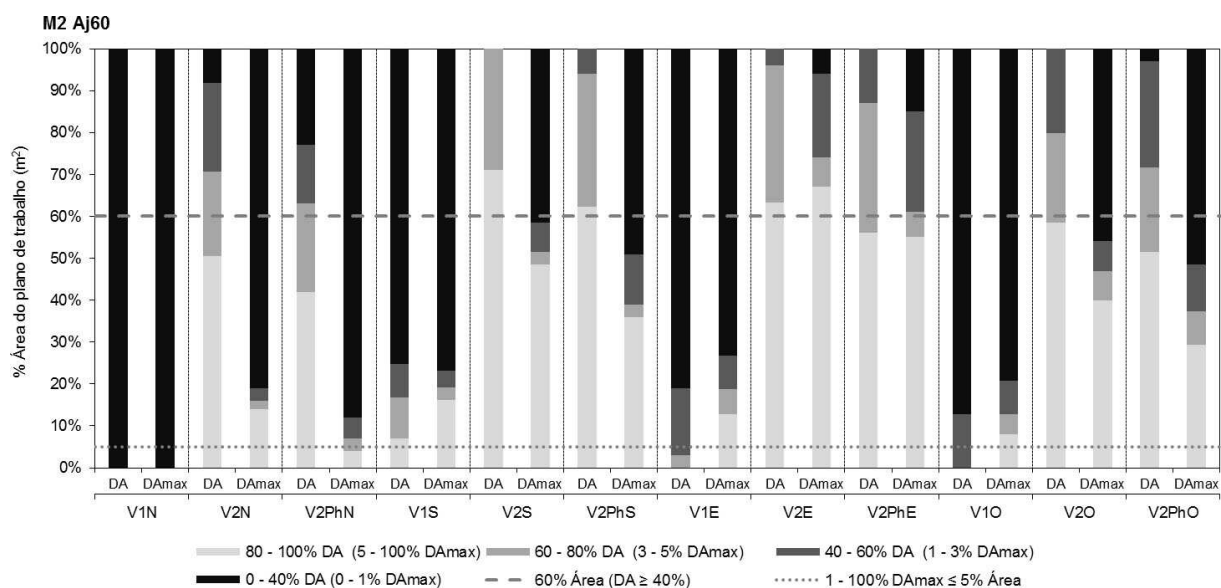


Figura 5.20: Comparação da distribuição do DA e DAmáx nas quatro orientações das Figuras 5.17 a 5.19.

casos com V1 (vidro escuro) continuam a ser escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos  $500lx$  de iluminância em 40% do período de ocupação. O comportamento apresentado nos restantes casos em relação à quantidade de luz e uniformidade é boa, indicando DA2+DA3 em 60% da área de trabalho.

Observa-se também que nos casos considerados como bem iluminados têm valores altos de DAmáx indicando probabilidade de ocorrência de brilho. O limiar de 1% DAmáx para mais de 5% da área de trabalho é excedido em todos os casos.

O aumento da abertura de janela para 60% contribuiu na quantidade e qualidade da luz interior em relação aos escritórios com Aj30 orientados a Norte e Oeste. Nos escritórios com Aj30 que anteriormente já eram considerados como bons em relação à quantidade de luz e uniformidade, o aumento da abertura para 60% só agrava as condições de conforto no que toca à probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento.

### Modelo 2 Aj30

As Figuras 5.21 a 5.23 resumem os resultados das simulações do Modelo 2 com abertura de janela de 90%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

A Figura 5.24 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAmáx, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

Através das Figuras 5.21 a 5.24, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M2Aj90. Consta-se que o aumento da área de janela para 90% os casos com V1 (vidro escuro) continuam a ser escritórios com má iluminação natural, não cumprindo

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

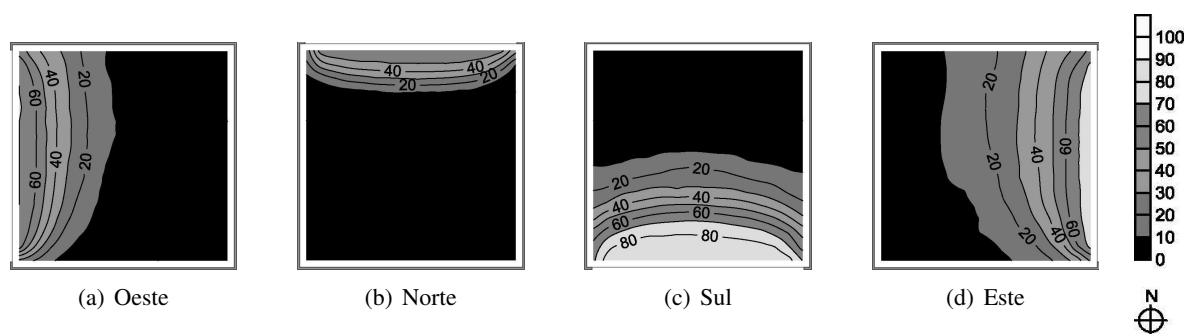


Figura 5.21: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj90V1, nas quatro orientações principais.

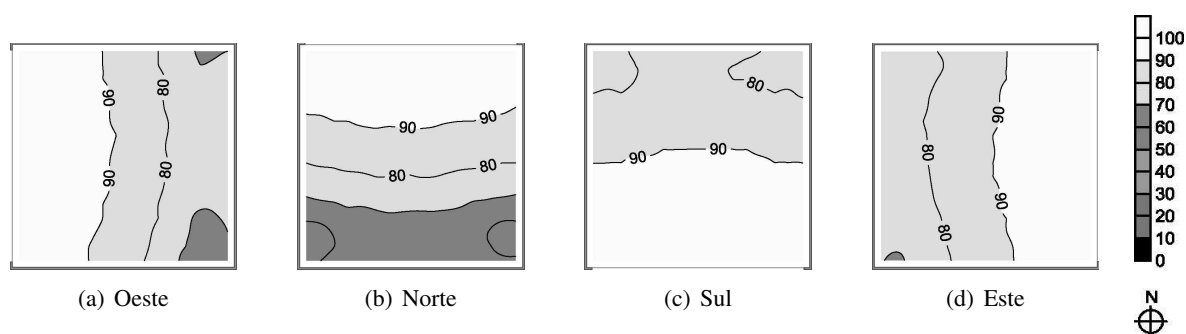


Figura 5.22: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj90V2, nas quatro orientações principais.

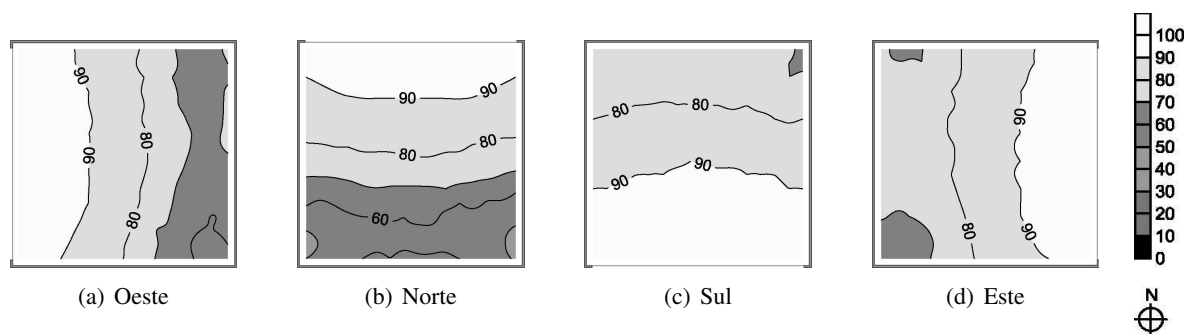


Figura 5.23: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M2Aj90V2Ph, nas quatro orientações principais.

o requisito de quantidade de luz com pelo menos  $500lx$  de iluminância em 40% do período de ocupação. O comportamento apresentado nos restantes casos em relação à quantidade de luz e uniformidade é boa, indicando DA3 em 60% da área de trabalho.

Verifica-se também que nos casos considerados como bem iluminados têm valores altos de  $DA_{max}$  indicando probabilidade de ocorrência de brilho. O limiar de 1%  $DA_{max}$  para mais de 5% da área de trabalho é excedido em todos os casos, indicando que é necessário melhor controlo da radiação solar directa.

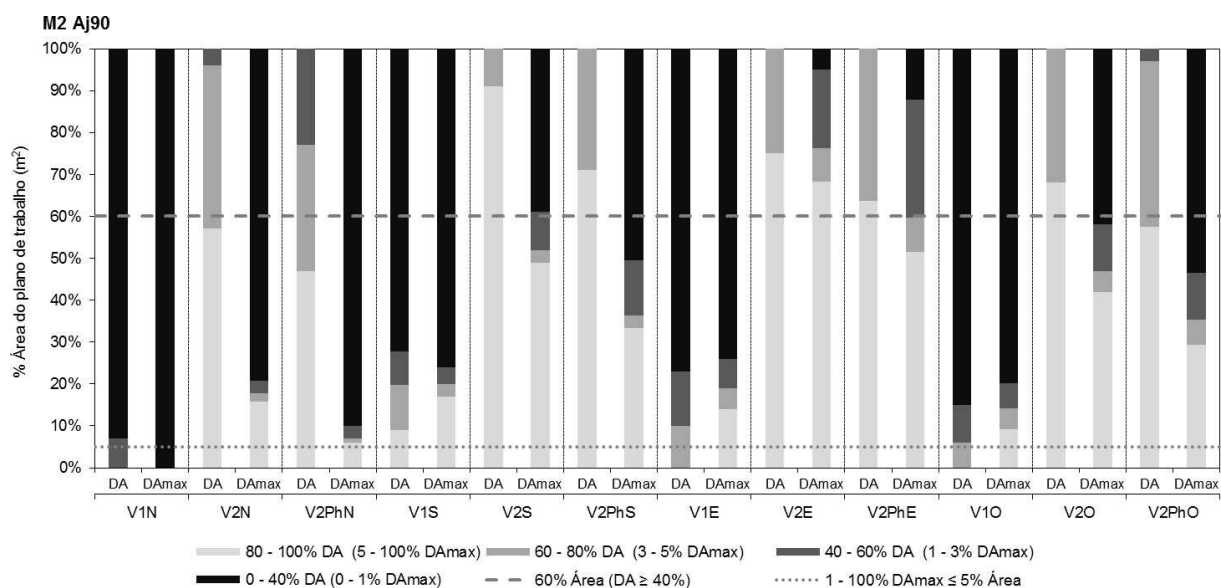


Figura 5.24: Comparação da distribuição do DA e DAmáx nas quatro orientações das Figuras 5.21 a 5.23.

O aumento da abertura de janela para 90% em nada contribui na quantidade e qualidade da luz interior nos escritórios com profundidade até 8m, este aumento só agrava as condições de conforto no que toca à probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento.

### Discussão dos resultados (Modelo 2)

Através dos resultados apresentados individualmente do Modelo2 nas situações Aj30 a Aj90, apresenta-se uma análise geral e comparativa entre os resultados, para assim ser possível analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das diferentes variáveis.

**A orientação**, no Modelo 2 também é um parâmetro que interfere nos valores de DA e DAmáx alcançados. Apesar de haver diferença na profundidade alcançada pela luz natural em todos os escritórios simulados, as orientações Sul, Este e Oeste a diferença de uma orientação para outra é pequena quando comparado com a orientação Norte. Entre as orientações estudadas a fachada Norte continua a ser a que apresenta valores mais baixos de DA, por ser a orientação menos exposta à radiação solar directa, tendo um máximo no caso M2Aj90V2N com DA1 em 4% DA2 em 39% e DA3 em 57% da área e DA1 em 7% da área do mesmo modelo com vidro escuro (Figura 5.22 e 5.21). A orientação Este e Oeste apresentam valores parecidos em quase todos os casos, apresentando valores máximos de DA2 25% e DA3 em 75% do plano de trabalho no caso M2Aj90V2E e DA2 em 32% e DA3 em 68% no mesmo caso com orientação Oeste (Figura 5.22). A orientação sul é a que apresenta valores mais altos de DA, chegando a um DA3 em 92% da área do plano de trabalho no caso M2Aj90V2S (Figura 5.22).

**A protecção solar** é um parâmetro que interfere significativamente no comportamento da luz natural. O mesmo modelo sem palas possui valores maiores de DA e DAmáx por metro quadrado. Tal como no Modelo 1, o uso de palas horizontais, com reflectância de 0.50 permitiu por um lado ambientes menos iluminados mas com maior controlo na ocorrência de brilho, quando comparado com o modelo sem

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

palas. O uso da protecção solar não inibiu o brilho por completo, em todos os casos o limiar de 1%  $DA_{max}$  para mais de 5% da área de trabalho é excedido, indicando que é necessário dispositivos mais eficazes (Figura 5.16, 5.20 e 5.24).

**Tipo de vidro.** O comportamento é semelhante ao ocorrido nos casos do M1, a diferença encontra-se nos valores de DA por metro quadrado. Os casos com V1 (vidro escuro) são escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos 40% de DA. Na maior parte dos casos com V1 não obtiveram luz natural na região mais afastada da janela, chegando no caso M2Aj30V1N a 0% do DA em 100% da área (Figura 5.13).

**Percentagem de área de janela.** As áreas mais próximas à janela continuam a ter maior quantidade de luz natural disponível no ambiente alcançando um DA de 90% em todos os casos M2Aj30V2, M2Aj60V2 e M2Aj90V2 (Figura 5.14, 5.18 e 5.22). Percebe-se que conforme o tamanho da abertura maior é a percentagem de área com valores mais elevados de DA. Por outro lado nos escritórios com V2 (vidro claro) o aumento da área de janela de 60% em diante em nada contribui na qualidade da luz interior, este aumento do envidraçado nesta tipologia só tende agravar as condições de conforto no que toca à probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento (Figura 5.20 e 5.24).

Comparando com o Modelo1, estes têm uma profundidade reduzida de 4m, alcançando os requisitos mínimos de quantidade e uniformidade com alguma facilidade, percebe-se que quanto menor a profundidade do escritório maior é a percentagem de área que apresenta valores de DA mais altos. Como exemplo este facto pode ser observado entre os casos M1Aj30V2S e M2Aj30V2S, ambos têm boa quantidade de luz e uniformidade, porém M1 tem DA3 em 100% e o M2 tem DA1 em 10%, DA2 em 14% e DA3 em 48% da área do plano de trabalho (Figura 5.4 e 5.16).

Nos Quadros E.4, E.5 e E.6 do Apêndice E estão resumidos os valores das percentagens de área do plano de trabalho com determinado DA e  $DA_{max}$  nos 36 casos simulados do Modelo 2.

### 5.1.3 Análise Modelo 3

Nesta terceira fase de simulações utiliza-se os escritórios denominados por Modelo 3 (M3) com as seguintes dimensões, 8,00m de largura por 16,00m de profundidade e pé direito de 2,70m. Este conjunto de simulações pretende da mesma forma analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência de diferentes parâmetros, mas num ambiente mais profundo.

#### Modelo 3 Aj30

As Figuras 5.25 a 5.27 resumem os resultados das simulações do Modelo 3 com abertura de janela de 30%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

A Figura 5.28 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e  $DA_{max}$ , sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

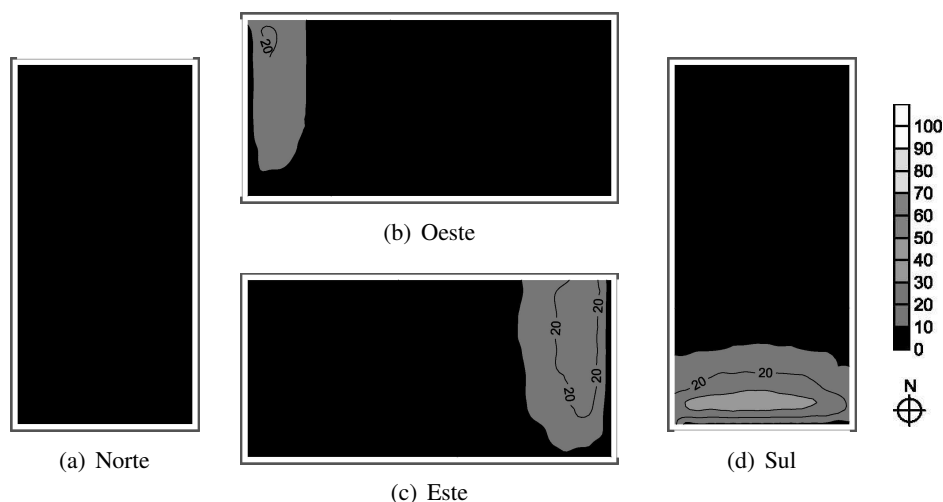


Figura 5.25: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj30V1, nas quatro orientações principais.

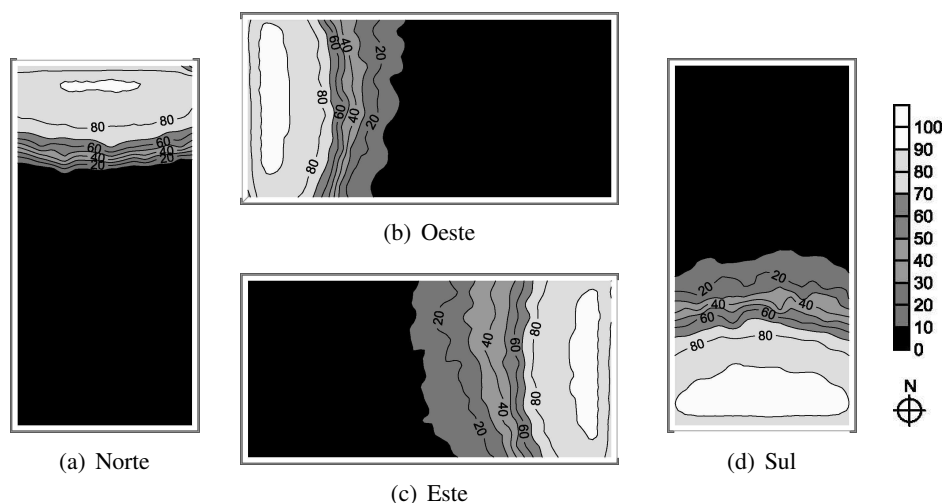


Figura 5.26: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj30V2, nas quatro orientações principais.

Através das Figuras 5.25 a 5.28, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M3Aj30. Consta-se que todos os casos são escritórios com má iluminação natural, não cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos  $500lx$  de iluminância em 40% do período de ocupação. O mau comportamento deve-se às limitações do dispositivo de admissão de luz lateral que produz iluminâncias excessivas nas proximidades às aberturas e insuficientes em pontos mais afastados, como o ambiente tem um comprimento elevado não satisfaz o requisito de quantidade e uniformidade em 60% do plano de trabalho.

Observa-se que mesmo com uma área do plano de trabalho elevada o limiar de 1%  $DA_{max}$  para mais de 5% da área é excedido em todos os casos indicando probabilidade de ocorrência de brilho, excepto nos casos orientados a Norte e com o tipo de vidro1 (vidro escuro).

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

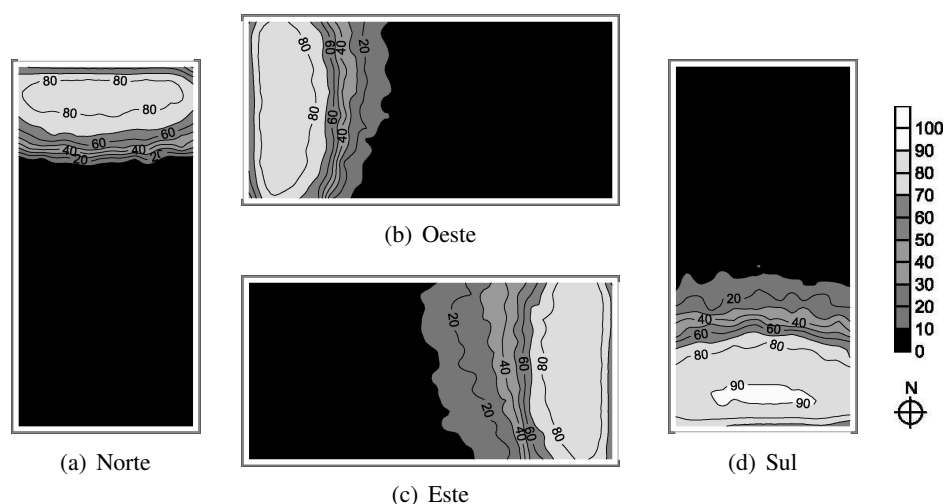


Figura 5.27: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj30V2Ph, nas quatro orientações principais.

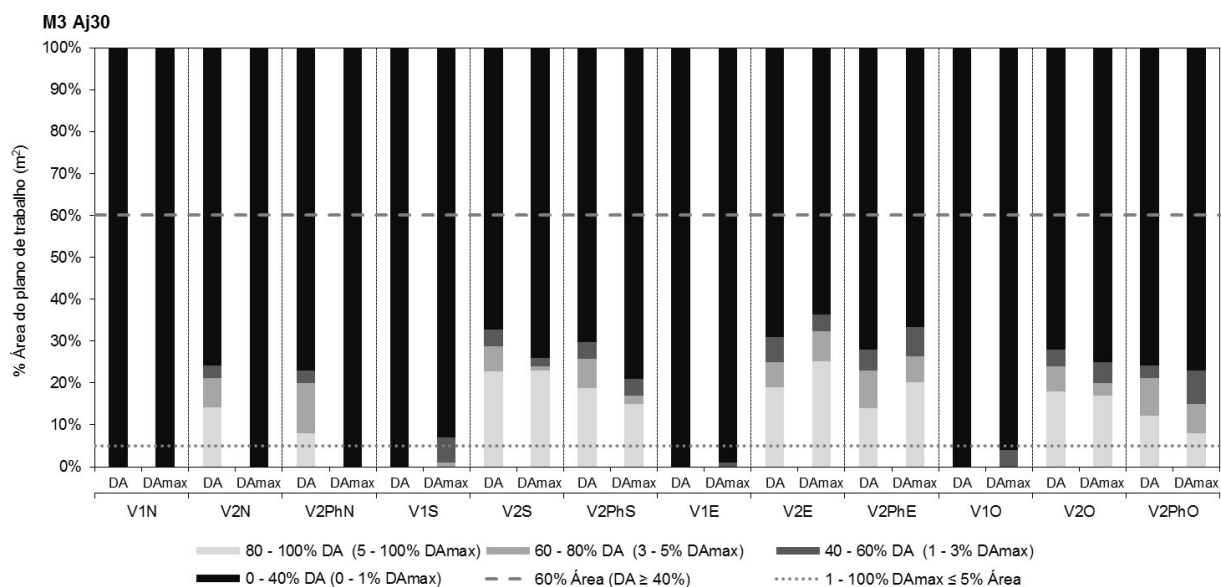


Figura 5.28: Comparação da distribuição do DA e DAmáx nas quatro orientações das Figuras 5.25 a 5.27.

### Modelo 3 Aj30

As Figuras 5.29 a 5.31 resumem os resultados das simulações do Modelo 3 com abertura de janela de 60%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

A Figura 5.32 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAmáx, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

Através das Figuras 5.29 a 5.32, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M3Aj60. Observa-se que o aumento da área de janela para 60% não altera a avaliação anteriormente atribuída para Aj30, continuam a ser escritórios com má iluminação natural, não

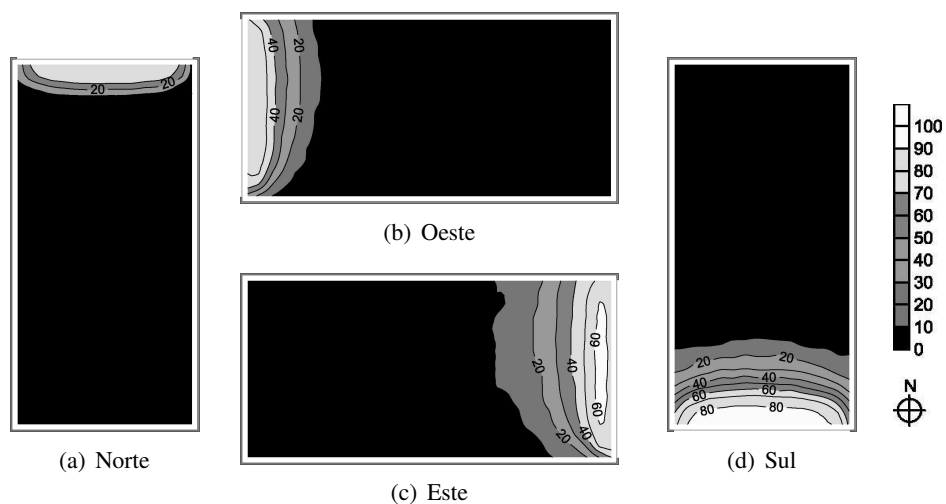


Figura 5.29: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj60V1, nas quatro orientações principais.

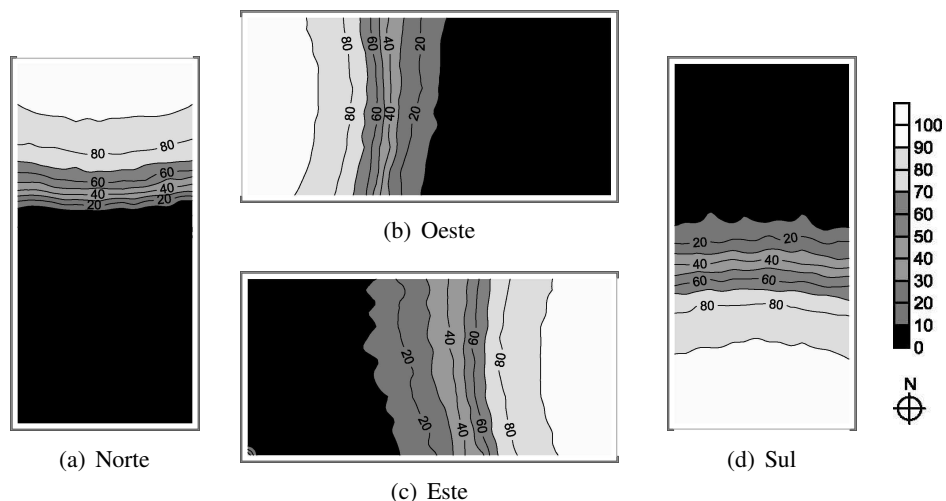


Figura 5.30: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj60V2, nas quatro orientações principais.

cumprindo o requisito de quantidade de luz com pelo menos  $500lx$  de iluminância em 40% do período de ocupação.

O aumento da abertura de janela para 60% contribui para o aumento da quantidade de luz natural no interior do escritório, no entanto não é suficiente para os classificar como aceitáveis. Quanto à qualidade da luz interior nos escritórios, há um decréscimo da mesma aumentando a probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento.

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

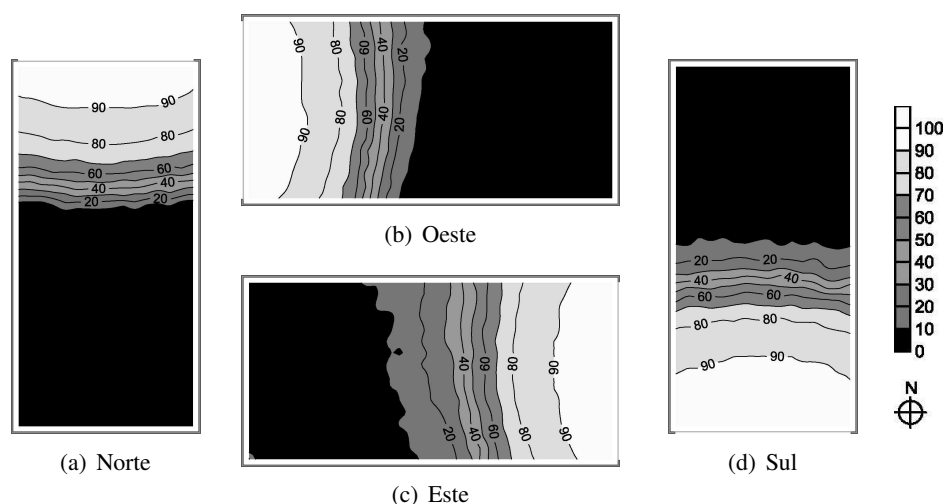


Figura 5.31: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj60V2Ph, nas quatro orientações principais.

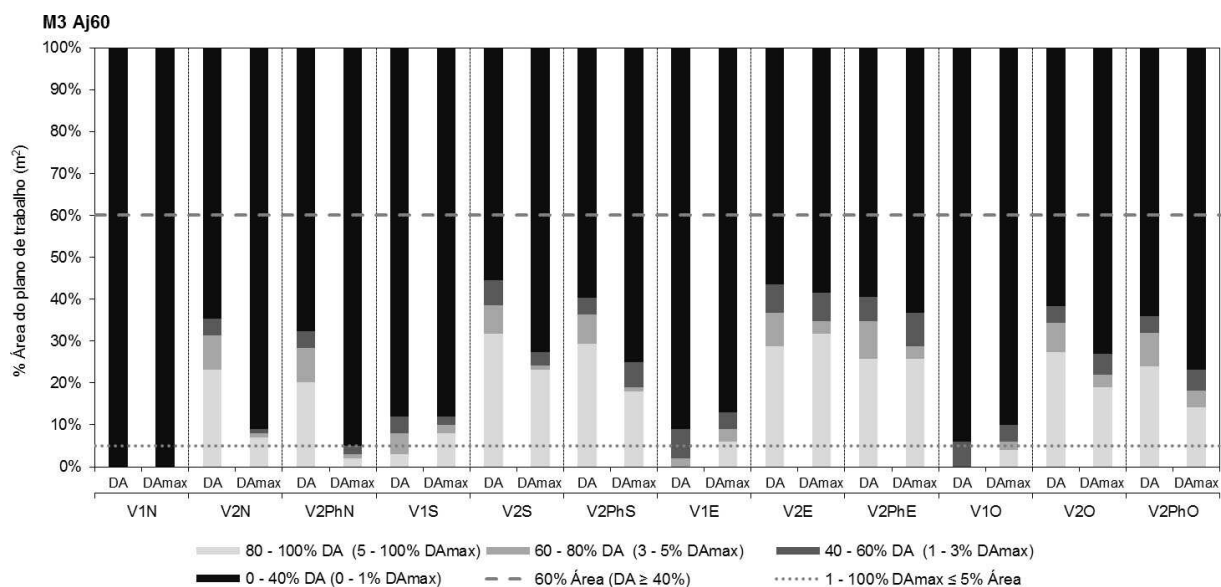


Figura 5.32: Comparação da distribuição do DA e DAmáx nas quatro orientações das Figuras 5.29 a 5.31.

### Modelo 3 Aj30

As Figuras 5.33 a 5.35 resumem os resultados das simulações do Modelo 3 com abertura de janela de 90%, apresentando a profundidade e distribuição alcançada pela luz natural.

A Figura 5.36 apresenta a comparação dos resultados obtidos de DA e DAmáx, sendo possível analisar a tendência dos resultados por orientação, tipo de vidro e uso de palas horizontais.

Através das Figuras 5.33 a 5.36, pode-se analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das variáveis definidas para o M3Aj90. Verifica-se que o aumento da área de janela para 90% não altera a avaliação anteriormente atribuída para Aj30 e Aj60.

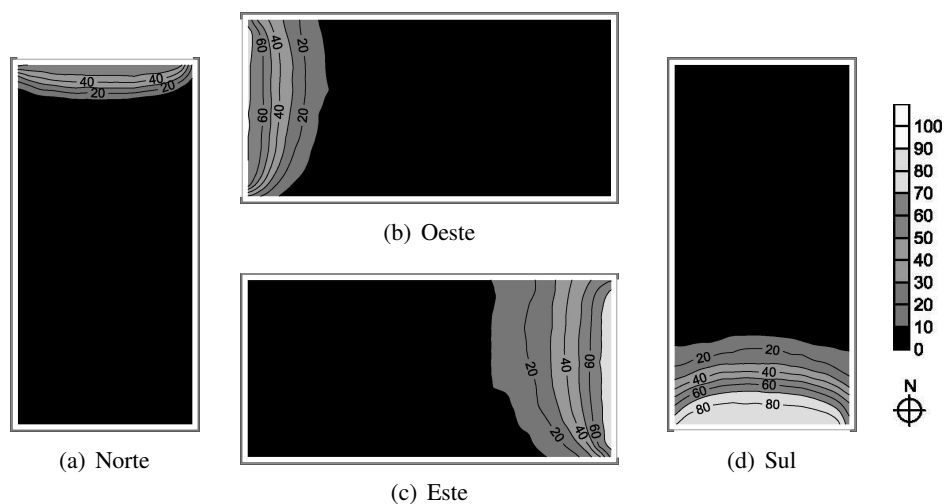


Figura 5.33: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj90V1, nas quatro orientações principais.

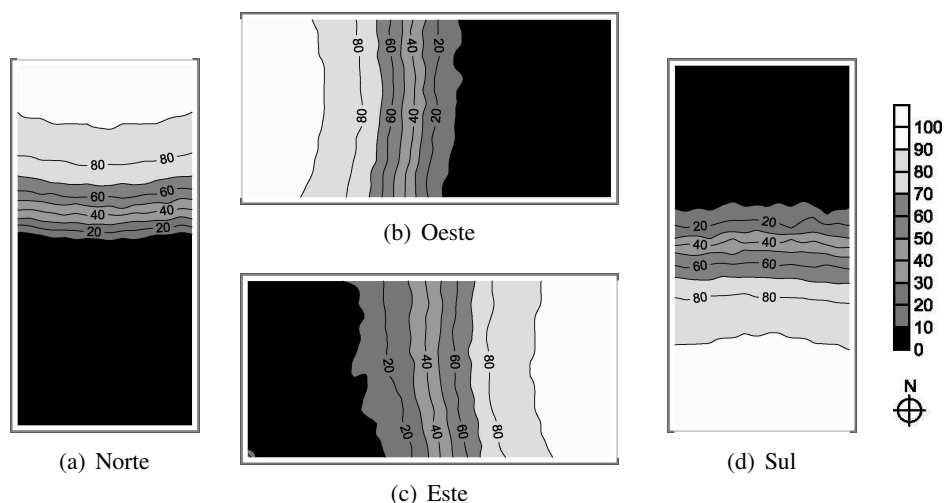


Figura 5.34: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj90V2, nas quatro orientações principais.

Tal como acontece com Aj60 o aumento da abertura de janela para 90% contribui para o aumento da quantidade de luz natural no interior do escritório no entanto não é suficiente para os classificar como aceitáveis. Quanto à qualidade da luz interior nos escritórios, há um decréscimo da mesma aumentando a probabilidade de ocorrência de brilho e ofuscamento.

## 5.1. COMPORTAMENTO DA LUZ NATURAL

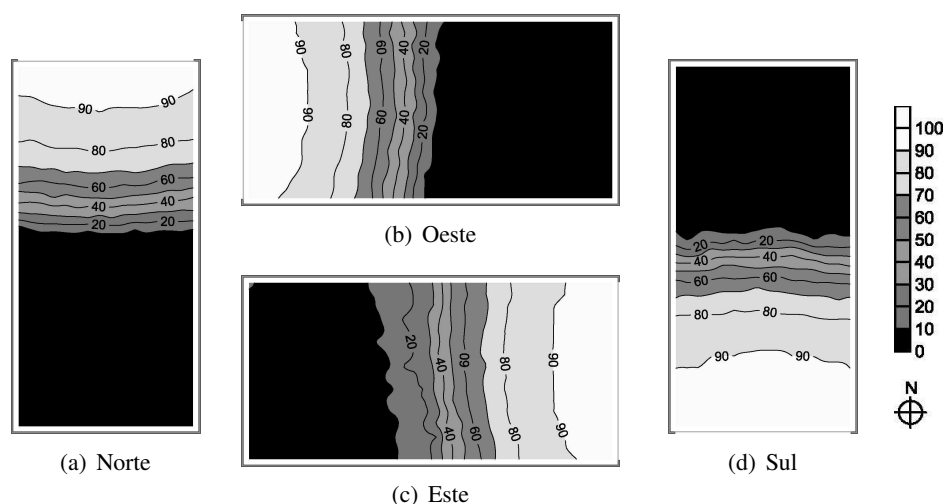


Figura 5.35: Valores de DA representados em gráfico de curvas isoDA. Tendência da distribuição do fluxo luminoso pela área do escritório M3Aj90V2Ph, nas quatro orientações principais.

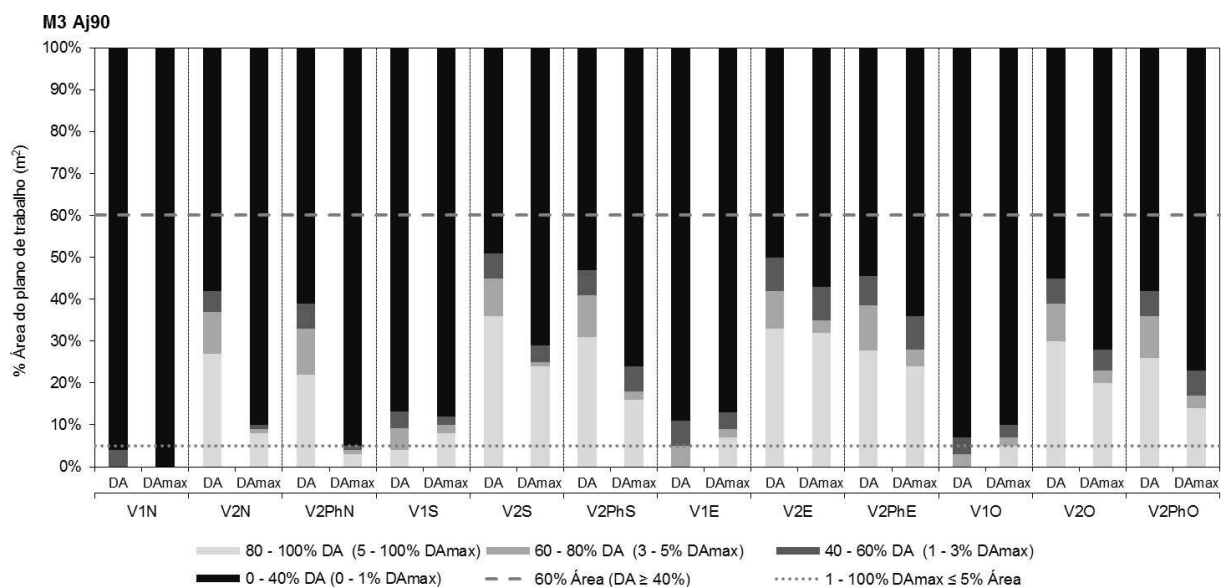


Figura 5.36: Comparação da distribuição do DA e DAmax nas quatro orientações das Figuras 5.33 a 5.35.

### Discussão dos resultados (Modelo 3)

Através dos resultados apresentados individualmente do Modelo3 nas situações Aj30 a Aj90, apresenta-se uma análise geral e comparativa entre os resultados, para assim ser possível analisar o comportamento da luz natural decorrente da influência das diferentes variáveis.

**A orientação**, tal como nos modelos anteriores é um parâmetro que interfere nos valores de DA e DAmax alcançados. Entre as orientações estudadas a fachada Norte continua a ser a que apresenta valores mais baixos de DA, por ser a orientação menos exposta à radiação solar directa, tendo um máximo no caso M3Aj90V2N com DA1 em 5%, DA2 em 10% e DA3 em 27% da área e DA1 em 4% da área do mesmo modelo com vidro escuro (Figura 5.34 e 5.33). A orientação Este e Oeste apresentam valores parecidos

em quase todos os casos, apresentando valores máximos de DA1 em 8%, DA2 em 9% e DA3 em 33% do plano de trabalho no caso M3Aj90V2E e DA1 em 6%, DA2 em 9% e DA3 em 30% no mesmo caso com orientação Oeste (Figura 5.34). A orientação sul é a que apresenta valores mais altos de DA, chegando a um DA3 em 36% da área do plano de trabalho no caso M3Aj90V2S (Figura 5.34).

**A protecção solar** demonstra um comportamento coerente de acordo com os modelos anteriores, permite por um lado ambientes menos iluminados, mas com maior controlo na ocorrência de brilho, quando comparado com o modelo sem palas. O uso da protecção solar não inibiu o brilho por completo, na maioria dos casos o limiar de 1% DAm<sub>ax</sub> para mais de 5% da área de trabalho é excedido, excepto no M3Aj60V2PhN (Figura 5.28, 5.32 e 5.36).

**Tipo de vidro.** O comportamento é semelhante ao verificado nos outros modelos, a diferença encontra-se nos valores de DA por metro quadrado. Em nenhum caso se obteve luz natural na região mais afastada da janela mas contrariamente ao que acontecia nas geometrias anteriores (M1 e M2) verifica-se em ambos os vidros e não apenas no V1. Neste caso o factor geometria tem maior peso no que toca ao alcance da luz natural (Figuras 5.25 a 5.27, 5.29 a 5.31 e 5.33 a 5.35).

**Percentagem de área de janela.** Como nos modelos 1 e 2, percebe-se que conforme o tamanho da abertura maior é a percentagem de área com valores mais elevados de DA. Como os escritórios são providos de iluminação unilateral as áreas mais próximas à janela continuam a ter maior quantidade de luz natural disponível no ambiente. O aumento da área de janela para 90% contribui na quantidade da luz interior embora não seja suficiente para os classificar como aceitáveis, este aumento do envidraçado nesta tipologia permite alcançar profundidades maiores no entanto é preciso não descurar o efeito indesejado perto do dispositivo de admissão com áreas mais susceptíveis de brilho e ofuscamento (Figura 5.28 a 5.36).

Os valores de DA obtidos com os casos M1 e M2 são os mesmos valores obtidos com o M3, é mantida a proporção na propagação da luz natural conforme se duplica o comprimento em relação ao modelo anterior. Consequentemente o M2 apresenta metade do DA por metro quadrado em relação ao M3 por sua vez o M2 apresenta também DA por metro quadrado duas vezes menor em relação ao M1.

Nos Quadros E.7, E.8 e E.9 do Apêndice E estão resumidos os valores das percentagens de área do plano de trabalho com determinado DA e DAm<sub>ax</sub> nos 36 casos simulados do Modelo 3.

#### 5.1.4 Conclusões dos resultados do comportamento da luz natural

De uma forma geral as aberturas de maiores satisfazem mais facilmente os valores de iluminância de projecto para ambientes de menor profundidade. Porém, podem gerar maior ganho de calor e níveis de iluminação em excesso na região próxima à abertura. Isto evidencia a necessidade de ter em conta a profundidade máxima dos ambientes.

A Figura 5.37 ilustra o caso com V2S com DA de maior alcance em relação à profundidade. Percebe-se que os casos dos Modelos 1, 2 e 3 possuem valores de DA semelhantes, o que diferencia é a percentagem de área em que ocorrem. Quanto maior a profundidade do escritório menor é a percentagem de área para

## 5.2. POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA ELÉCTRICA

um alto valor de DA. Os valores de DA obtido nos casos do Modelo 1 atingem uma grande percentagem de área, alcançando a região mais afastada da janela com 100%.

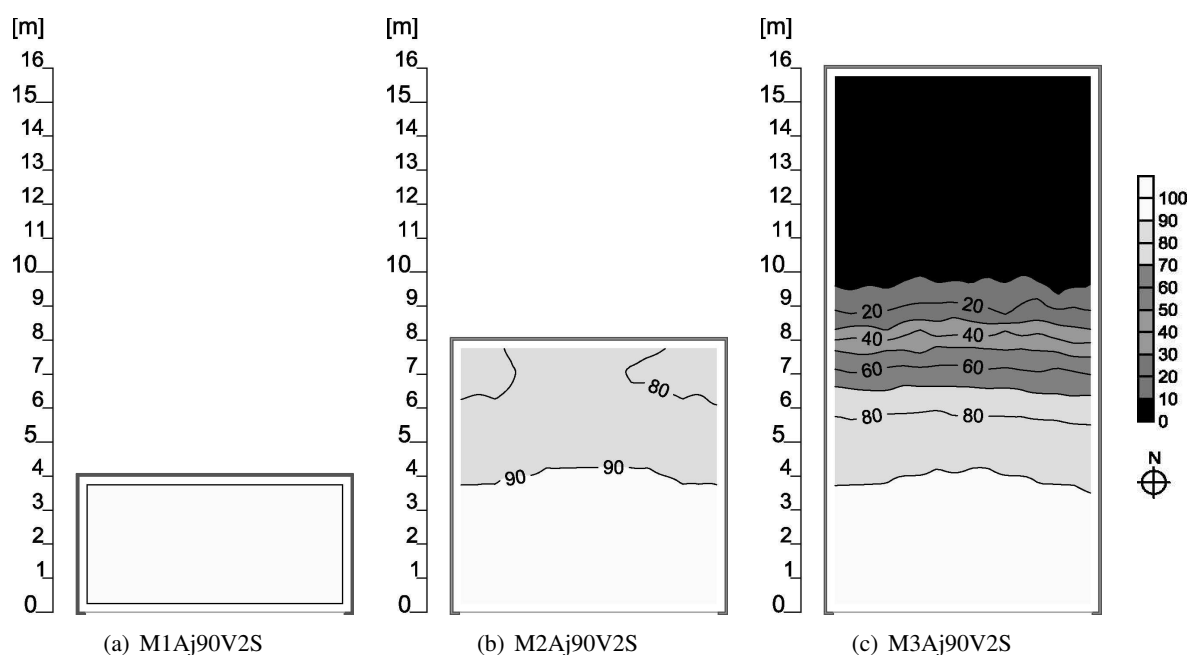


Figura 5.37: Síntese dos modelos em relação à profundidade.

No caso da iluminação lateral existem diversas regras que limitam a profundidade de penetração da luz natural em relação à altura da janela. Reinhart (2005) lista inúmeras dessas regras indicando uma profundidade limite 1,5 a 2,5 vezes a altura da janela ao piso, no entanto não é claro o que é considerado como nível de iluminação natural mínima, nem para que regiões climáticas, ou tipo de edifícios e orientações em que pode ser aplicada. Segundo os critérios de aceitação propostos anteriormente a quantidade de luz do dia deve ser igual ou superior a  $500lx$  de iluminação durante pelo menos 40% do tempo. A aplicação destes critérios nos resultados apresentados na Figura 5.37 resulta numa distância máxima de 8m enquanto que as regras acima indicadas por Reinhart (2005) levam a valores de 4 a 7m, para uma altura de 2,63m entre o piso e a parte superior da janela.

Mesmo sem recorrer às simulações termo-energéticas integradas é possível inferir pelos valores de DA que variando a profundidade das salas, as menos profundas são as que apresentam um maior potencial de economia de energia em iluminação artificial.

## 5.2 Potencial de economia de energia eléctrica

Nas simulações integradas realizadas pelo E+ são levantados valores de consumo de energia por uso final em equipamentos, iluminação, ventilação e ar condicionado de cada caso em estudo. Estas para o M1, M2 e M3 são realizadas com sistema de ar-condicionado/ventilação, iluminação artificial com controle de presença e sistema dimerizável, integração da iluminação natural e cargas internas (equipamentos e ocupação). Os consumos com ar-condicionado são na sua maioria de arrefecimento, o aquecimento é

nulo por se tratar de ambientes de trabalho onde as cargas internas são altas e suficientes para aquecer o ambiente no inverno.

A partir dos consumos de electricidade é possível obter os potencial de economia. Todas as simulações têm como referência comparativa os resultados do Modelo base (MB), que considera a iluminação artificial ligada de acordo com o perfil do RSECE.

Os resultados estão sintetizados em quatro grupos de acordo com a sua geometria (MB, M1, M2 e M3). Cada grupo contém 36 casos diferentes excepto o MB com 12. Em cada grupo há uma discussão dos resultados.

### 5.2.1 Modelo Base

Como referido na secção 4.2.2 as simulações termo-energéticas dos modelos tidos como base foram realizadas somente com o sistema de ar-condicionado/ventilação, iluminação artificial e cargas internas (equipamentos e ocupação).

Os resultados de consumos de energia eléctrica variam entre  $90,4KWh/m^2.ano$  para o caso base de geometria 2 orientado a Norte e  $142,8KWh/m^2.ano$  para o caso base de geometria 1. Os resultados de consumo de energia eléctrica dos modelos base, separados por uso final (iluminação artificial, ar-condicionado, ventilação e equipamentos), encontram-se no Quadro F.1 do Apêndice F.

A Figura 5.38 apresenta o consumo estimado de energia eléctrica total por orientação para as três geometrias base (MB1, MB2 e MB3). Já Figura 5.39 apresenta o consumo estimado de energia eléctrica separado por uso final, por orientação para as três geometrias base (MB1, MB2 e MB3).

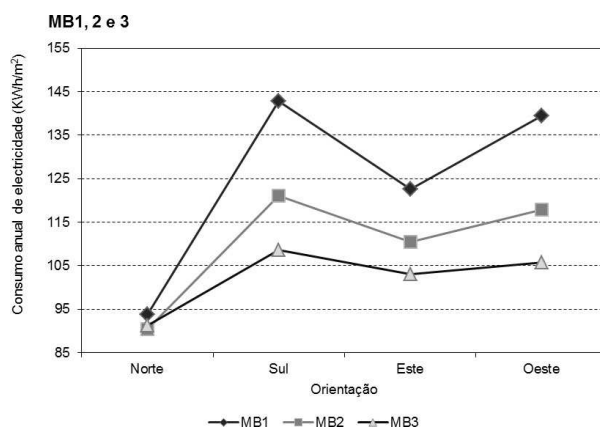


Figura 5.38: Consumo total de energia eléctrica por orientação (Norte, Sul, Este e Oeste) para o modelo base 1, 2 e 3.

Como os consumos em iluminação e equipamentos são constantes por área ocupada, pode-se constatar que para orientações diferentes têm-se consumos de ar-condicionado e ventilação diferentes. Em todos os modelos base as orientações com maior consumo são: Sul seguido de Oeste, Este e por fim Norte. Essa diferença de consumos deve-se à geometria solar que proporciona maior exposição aumentando a carga térmica interna. Desta forma precisa de maior capacidade de arrefecimento e ventilação, que resulta num

## 5.2. POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA ELÉCTRICA

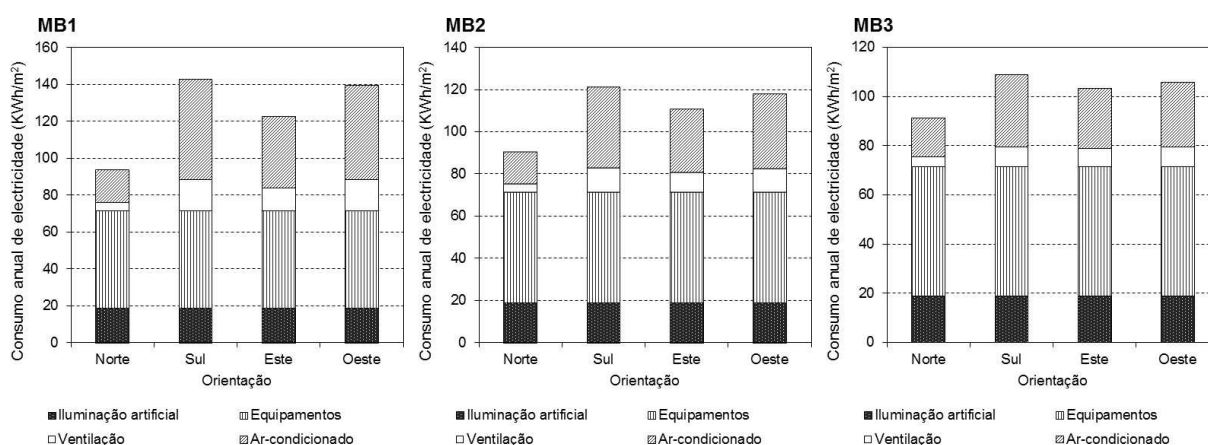


Figura 5.39: Consumo nominal de energia eléctrica, separado por uso final para os modelos base 1, 2 e 3, nas quatro orientações principais.

aumento do consumo do *split*. Os consumos anuais de ar-condicionado são apenas para arrefecimento sendo que os consumos de aquecimento são nulos durante todo o ano devido à elevada carga térmica interna.

Comparando o consumo entre as várias geometrias, percebe-se que quanto menor o ambiente, maior o consumo total de energia eléctrica, independentemente da orientação. Os ambientes mais profundos dissipam e distribuem melhor os ganhos térmicos diminuindo os consumos de ventilação e refrigeração.

### 5.2.2 Modelo 1

Os resultados dos consumos estimados de energia eléctrica variam entre  $71,9 KWh/m^2.ano$  para o M1A<sub>j</sub>30V2N ( $A_j$ 30%, vidro 2, orientação a Norte), e  $124,4 KWh/m^2.ano$  para o M1A<sub>j</sub>90V2S ( $A_j$ 90%, vidro 2, orientado a Sul). Os resultados do consumo estimado de energia eléctrica de M1, separado por uso final (iluminação artificial, ar-condicionado, ventilação e equipamentos), encontram-se no Quadro F.2 do Apêndice F.

A Figura 5.40 apresenta o consumo estimado de energia eléctrica total para diferentes aberturas de janela, para M1 com envidraçado V1 (escuro), V2 (claro) e V2 com palas horizontais, nas quatro orientação principais. Já a Figura 5.41 representa a comparação com MB1 do consumo estimado de energia eléctrica separado por uso final, para diferentes áreas de janela, tipo de vidro, pala horizontal e nas quatro orientações principais.

Na análise comparativa com o MB só são apresentados os consumos com ar condicionado ventilação e iluminação isto porque o consumo em equipamentos não interfere nas análises, por ser igual para todos os casos. Todas as simulações têm como referência comparativa os resultados do Modelo base (MB), que considera a iluminação artificial ligada de acordo com o perfil de iluminação do RSECE. As reduções de consumo entre o M1 e o MB, por orientação e área de janela encontram-se no Quadro G.1 do Apêndice G.

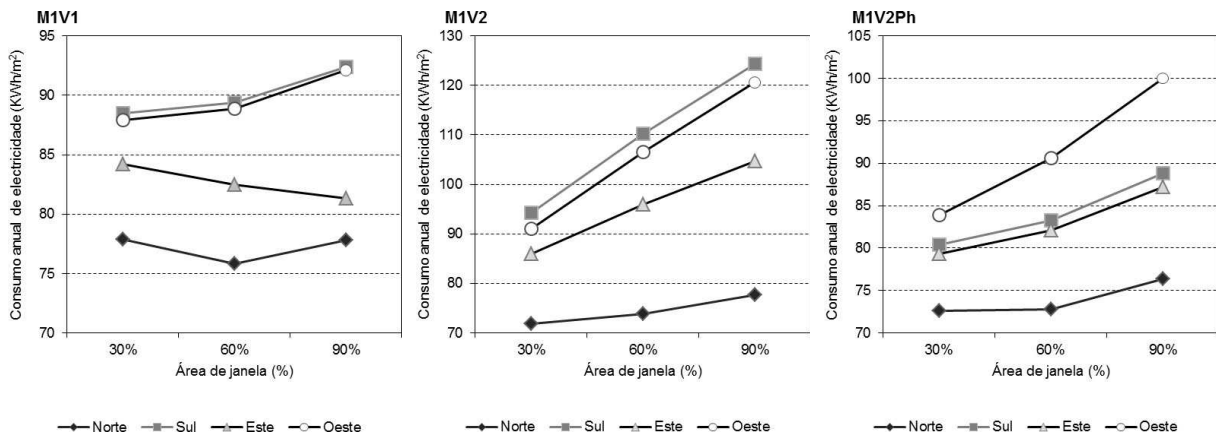


Figura 5.40: Consumo total estimado de energia eléctrica por área de janela (30%, 60% e 90%) para o modelo 1 com o vidro 1(escuro), vidro 2(claro) e vidro 2 com palas horizontais, nas quatro orientações principais.

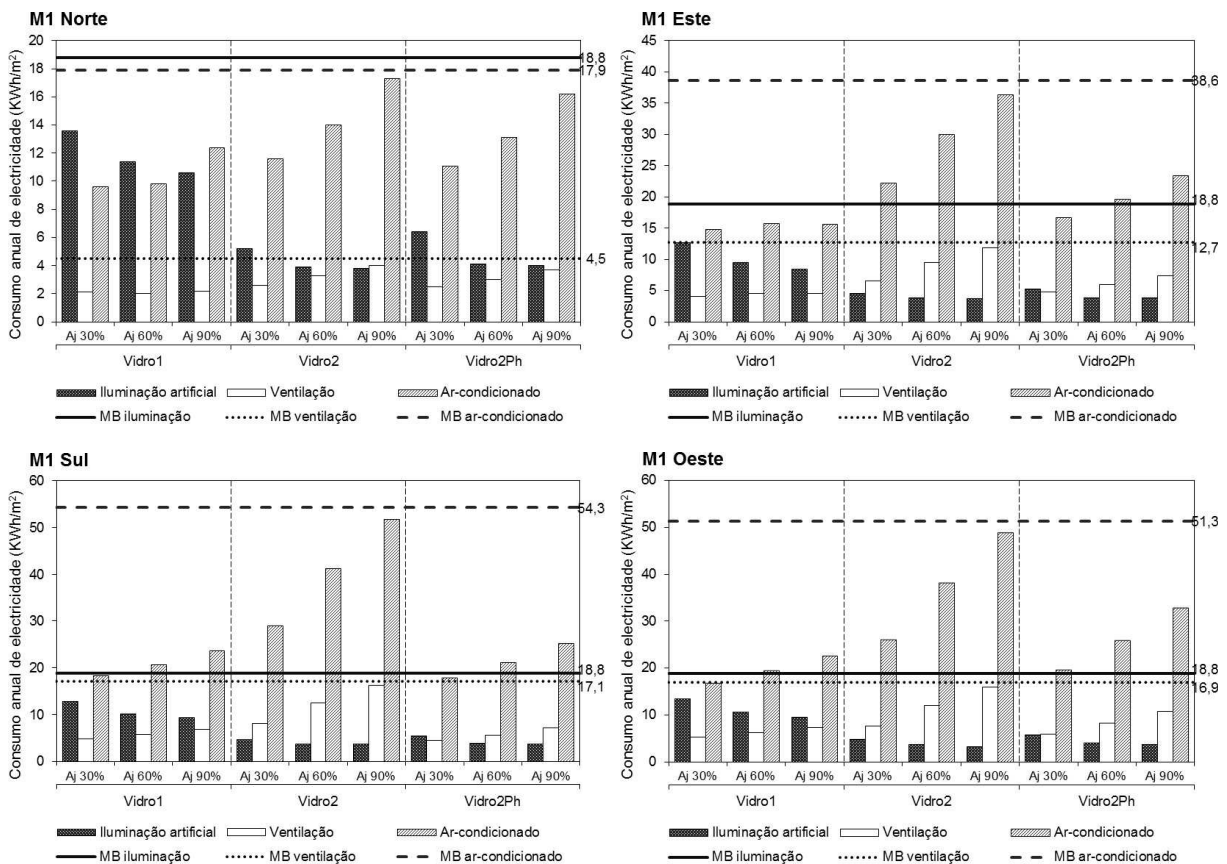


Figura 5.41: Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final, do escritório M1 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

Como se pode observar, o comportamento do consumo de energia eléctrica em função da área de janela não é linear. Os consumos em iluminação artificial diminuem com o aumento da área de janela e com o uso de vidros claros, devido ao maior aproveitamento da luz natural. Neste caso a redução em energia eléctrica pode chegar a 83%, no M1Aj90V2O (Aj90%, vidro 2, orientação a Oeste).

## 5.2. POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA ELÉCTRICA

O aproveitamento da luz natural para diminuir o consumo em iluminação artificial, resulta em menor carga térmica do ambiente, o que se traduz numa diminuição do consumo de energia do sistema de ar-condicionado e ventilação, quando comparado com o MB1. Neste caso a redução pode chegar a 67,3% no consumo do ar-condicionado, no M1Aj30V1O ( $A_j$ 30%, vidro 1, orientado a Oeste) e 71,9% no consumo da ventilação, no M1Aj30V1S ( $A_j$ 30%, vidro 1, orientação Sul).

Tanto os consumos do ar-condicionado como da ventilação aumentam gradualmente, com o aumento da área de janela independentemente do tipo de vidro (claro ou escuro), protecção solar (com ou sem pala horizontal) e orientação.

Em relação ao consumo total de energia eléctrica quando se explora a luz natural como luminária principal, reduz-se em 59,9% no M1Aj90V2PhS ( $A_j$ 90%, vidro 2 com pala horizontal e orientação Sul). Analisando os valores médios de redução de consumo, as maiores reduções no consumo de energia eléctrica ocorreram para a orientação Sul e as menores para a Orientação Norte. Porém, o consumo médio total ( $KWh/m^2$ ) para a orientação Norte é o menor dentro das quatro orientações.

### 5.2.3 Modelo 2

Os resultados dos consumos estimados de energia eléctrica variam entre  $73,9KWh/m^2.ano$  para o M2Aj90V2PhN ( $A_j$ 90%, vidro 2 com pala horizontal, orientação a Norte), e  $103,4KWh/m^2.ano$  para o M2Aj90V2S ( $A_j$ 90%, vidro 2, orientado a Sul). Os resultados do consumo estimado de energia eléctrica de M2, separado por uso final (iluminação artificial, ar-condicionado, ventilação e equipamentos), encontram-se no Quadro F.3 do Apêndice F.

A Figura 5.42 apresenta o consumo estimado de energia eléctrica total para diferentes aberturas de janela, para M2 com envidraçado V1 (escuro), V2 (claro) e V2 com palas horizontais, nas quatro orientação principais. Já a Figura 5.43 representa a comparação com MB2 do consumo estimado de energia eléctrica separado por uso final, para diferentes áreas de janela, tipo de vidro, pala horizontal e nas quatro orientações principais.

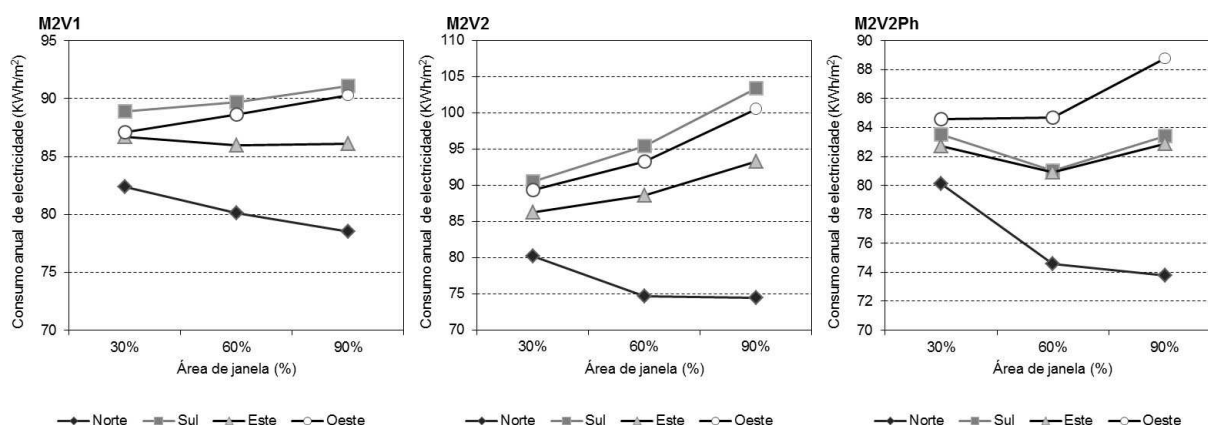


Figura 5.42: Consumo total estimado de energia eléctrica por área de janela (30%, 60% e 90%) para o modelo 2 com o vidro 1(escuro), vidro 2(claro) e vidro 2 com palas horizontais, nas quatro orientações principais.

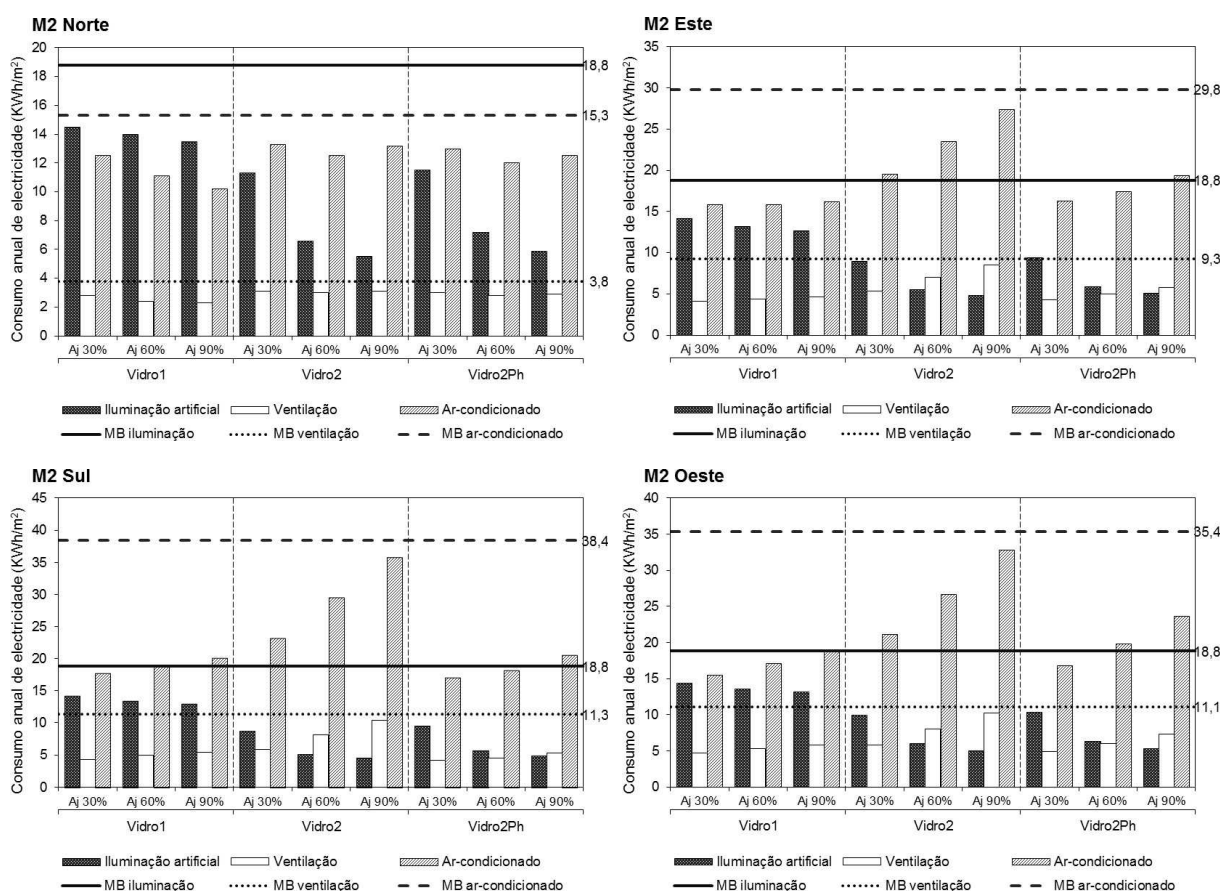


Figura 5.43: Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final, do escritório M2 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

As reduções de consumo entre o M2 e o MB, por orientação e área de janela encontram-se no Quadro G.2 do Apêndice G.

Como se pode observar, o comportamento do consumo de energia eléctrica em função da área de janela não é linear. Os consumos em iluminação artificial diminuem com o aumento da área de janela e com o uso de vidros claros, devido ao maior aproveitamento da luz natural. Neste caso a redução em energia eléctrica pode alcançar 58,5%, no M2Aj60V2PhS ( $A_j$ 60%, vidro 2 com pala horizontal, orientação Sul).

Quando comparado com o MB2, o aproveitamento da luz natural para diminuir o consumo em iluminação artificial, resulta em menor carga térmica do ambiente. Neste caso a redução do ar-condicionado e da ventilação, são: 56,2% no M2Aj30V1O ( $A_j$ 30%, vidro 1, orientado a Oeste) e 61,9% no M2Aj30V1S ( $A_j$ 30%, vidro 1, orientação Sul), respectivamente.

Tanto os consumos do ar-condicionado como da ventilação aumentam gradualmente, com o aumento da área de janela independentemente do tipo de vidro (claro ou escuro), protecção solar (com ou sem pala horizontal) e orientação.

## 5.2. POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA ELÉCTRICA

Em relação ao consumo total de energia eléctrica quando se explora a luz natural como luminária principal, reduz-se em 58,5% no M2Aj60V2PhS ( $A_j$ 90%, vidro 2 com pala horizontal e orientação Sul). Analisando os valores médios de redução de consumo, as maiores reduções no consumo de energia eléctrica ocorreram para a orientação Sul e as menores para a Orientação Norte. Porém, o consumo médio total ( $KWh/m^2$ ) para a orientação Norte continua a ser o menor dentro das quatro orientações.

### 5.2.4 Modelo 3

Os resultados dos consumos estimados de energia eléctrica variam entre  $83,2KWh/m^2.ano$  para o M3Aj90V1N ( $A_j$ 90%, vidro 1, orientação Norte), e  $100,5KWh/m^2.ano$  para o M3Aj90V2S ( $A_j$ 90%, vidro 2, orientação Sul). Os resultados do consumo estimado de energia eléctrica de M3, separado por uso final (iluminação artificial, ar-condicionado, ventilação e equipamentos), encontram-se no Quadro F.4 do Apêndice F.

A Figura 5.44 apresenta o consumo estimado de energia eléctrica total para diferentes aberturas de janela, para M3 com envidraçado V1 (escuro), V2 (claro) e V2 com palas horizontais, nas quatro orientações principais. Já a Figura 5.45 representa a comparação com MB3 do consumo estimado de energia eléctrica separado por uso final, para diferentes áreas de janela, tipo de vidro, pala horizontal e nas quatro orientações principais.

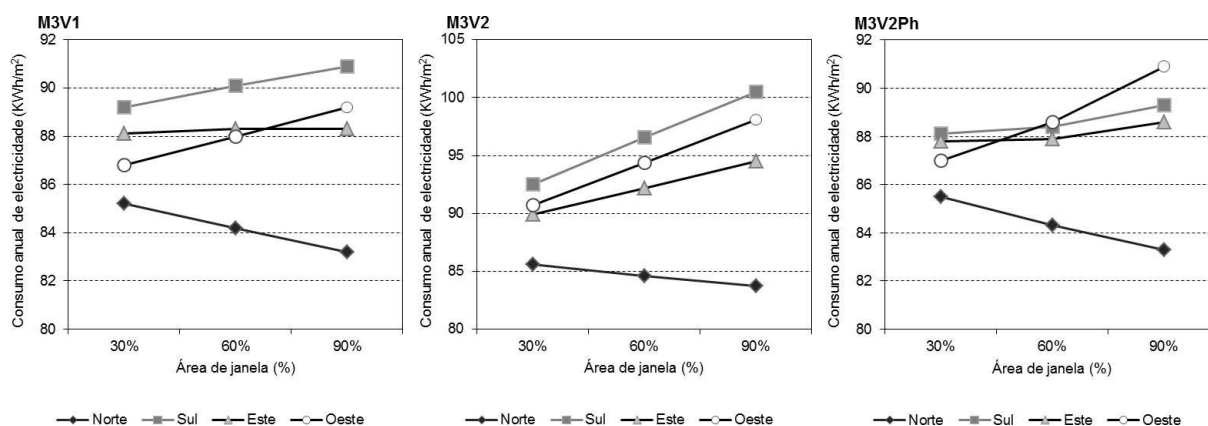


Figura 5.44: Consumo total estimado de energia eléctrica por área de janela (30%, 60% e 90%) para o modelo 3 com o vidro 1(escuro), vidro 2(claro) e vidro 2 com palas horizontais, nas quatro orientações principais.

As reduções de consumo entre o M3 e o MB, por orientação e área de janela encontram-se no Quadro G.3 do Apêndice G.

Como se pode constatar, o comportamento do consumo de energia eléctrica em função da área de janela não é linear. Os consumos em iluminação artificial diminuem com o aumento da área de janela e com o uso de vidros claros, devido ao maior aproveitamento da luz natural. Neste caso a redução em energia eléctrica pode alcançar 36,8%, no M3Aj30V2PhS ( $A_j$ 30%, vidro 2 com pala horizontal, orientação Sul).

A redução do ar-condicionado e da ventilação, são: 43,6% no M3Aj30V1O ( $A_j$ 30%, vidro 1, orientado a Oeste) e 48,8% no M3Aj30V1S ( $A_j$ 30%, vidro 1, orientação Sul), respectivamente.

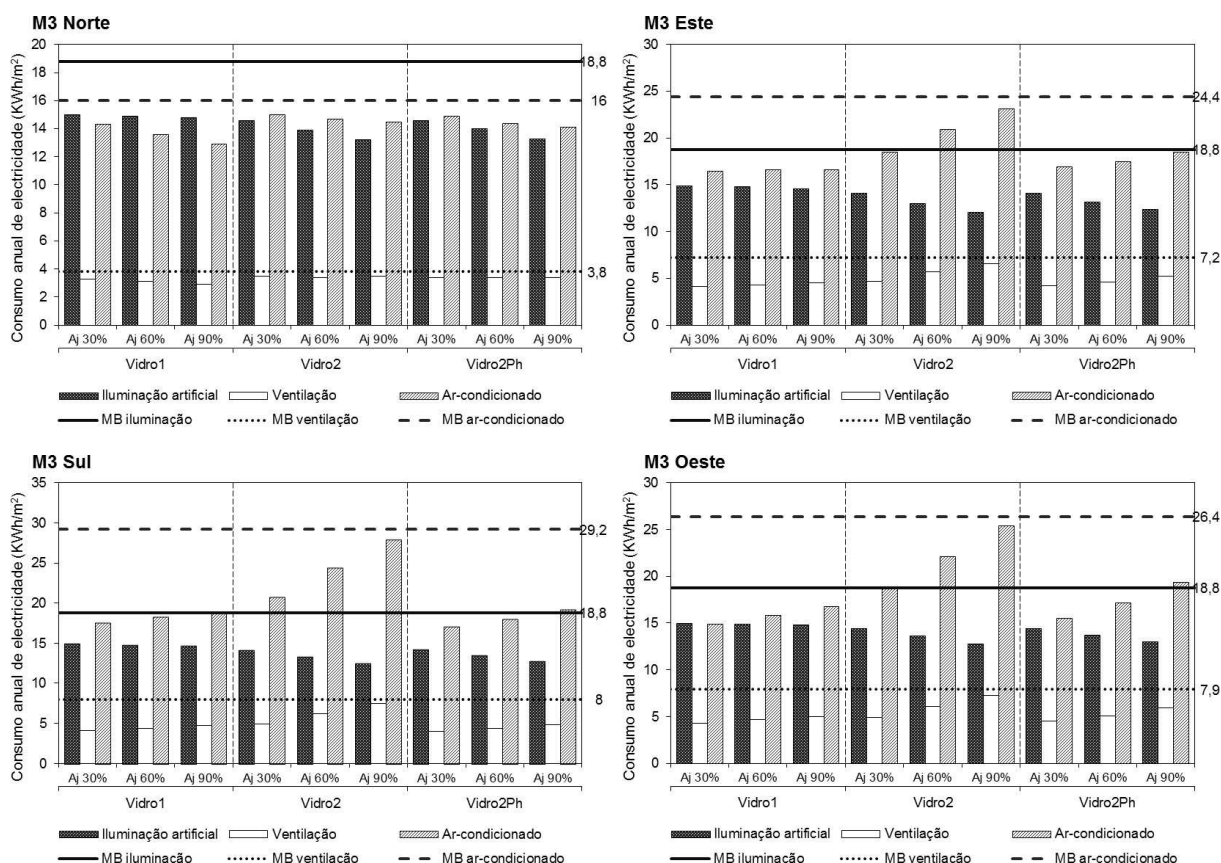


Figura 5.45: Consumo estimado de energia eléctrica, separado por uso final, do escritório M3 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

Quando se explora a luz natural como luminária principal, reduz-se o consumo total de energia eléctrica em 36,8% no M3Aj30V2PhS ( $A_j30\%$ , vidro 2 com pala horizontal e orientação Sul). Tal como acontece nos modelos anteriores, os valores médios mais altos de redução de consumo para a orientação Sul e as menores para a Orientação Norte. Porém, o consumo médio total ( $KWh/m^2$ ) para a orientação Norte continua a ser o menor dentro das quatro orientações.

### 5.2.5 Conclusões dos resultados do potencial de economia de energia eléctrica

Na análise dos diferentes modelos avaliados observa-se que todos os Modelos com o Aj90, com V2 sem protecção solar apresentam menor consumo com iluminação artificial, porém maior consumo com ar-condicionado e ventilação.

Os resultados obtidos com os diferentes modelos tornam possível identificar uma tendência na relação entre o consumo de energia e parâmetros geométricos. Essa tendência pode ser observada na Figura 5.46, que ilustra os consumos estimados de iluminação, ventilação, ar-condicionado e total dos 108 casos simulados.

### 5.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E VISUAL

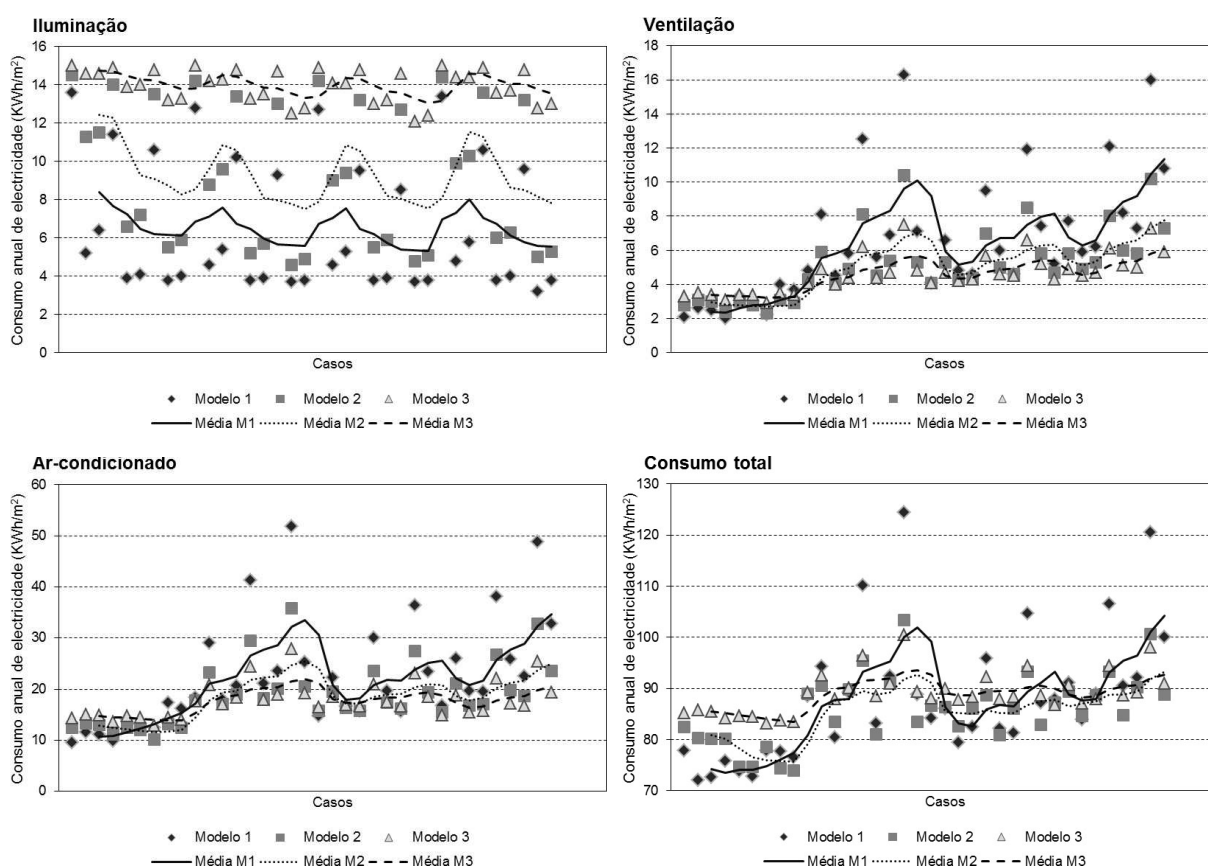


Figura 5.46: Consumo estimado de energia eléctrica, separado por iluminação, ventilação, ar-condicionado e total relacionado com diferentes volumetrias.

Na análise do consumo com iluminação artificial da Figura 5.46 os modelos com menor volume têm tendência a mostrar menos consumo de electricidade. No entanto considerando os consumos médios de ar-condicionado e ventilação da Figura 5.46 demonstram uma menor capacidade para dissipar os ganhos térmicos provenientes da introdução da luz natural. Do mesmo modo os modelos de geometrias maiores (M2 e M3) têm consumos com ar-condicionado e ventilação menores e iluminação artificial superior.

### 5.3 Avaliação do desempenho energético e visual

A avaliação do desempenho energético e visual é efectuada através das medidas dinâmicas *Daylight Autonomy* (DA), *Daylight Autonomy maximum* (DAm<sub>ax</sub>) e dos consumos estimados de energia eléctrica.

Os resultados estão sintetizados em três grupos de acordo com a sua geometria (M1, M2 e M3). Cada grupo contém 36 casos diferentes. Em cada grupo há uma discussão dos resultados.

5.3.1 Modelo 1

A Figura 5.47 resume os resultados das simulações do Modelo 1 com a sobreposição dos critérios visuais com os consumos estimados.

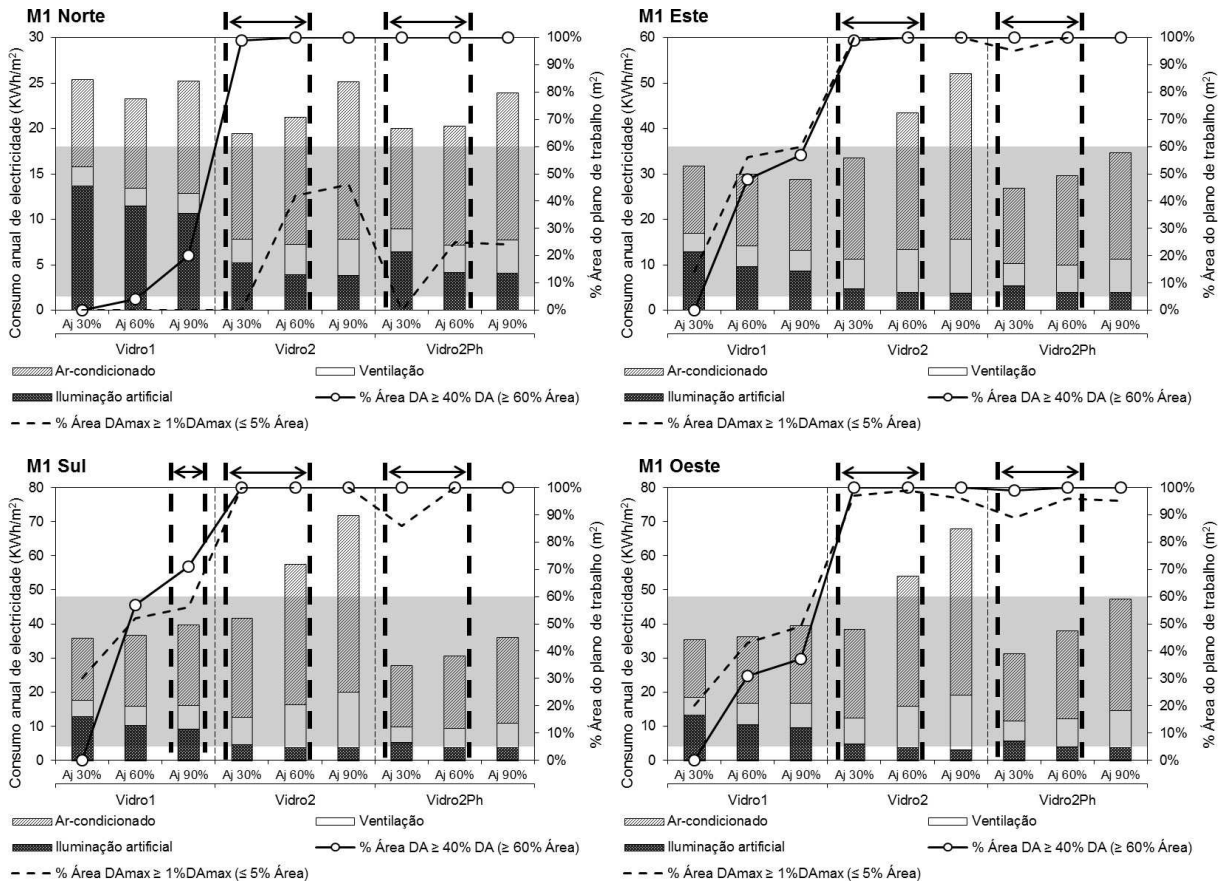


Figura 5.47: Soluções para o uso de energia, desempenho visual e conforto do escritório M1 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

Através da análise gráfica é possível definir quais as soluções mais adequadas. Casos que obrigatoriamente cumprem o critério de quantidade e uniformidade visual ocorrem a Norte, Este e Oeste: Aj30-90 com vidro 2 e Aj30-90 com vidro 2 e palas horizontais e a Sul: Aj90 com vidro 1, Aj30-90 com vidro 2 e vidro 2 com palas horizontais.

O espaço de soluções é delimitado pela intersecção entre o cumprimento de pelo menos um critério de conforto visual, de quantidade de luz e da região crítica em que a luz do dia não contribui para a poupança de iluminação artificial. A gama de valores para Norte, Este e Oeste: Aj30-60 com vidro 2 e com vidro 2 e palas horizontais e a Sul: Aj90 com vidro 1, Aj30-60 com vidro 2 e vidro 2 com palas horizontais.

### 5.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E VISUAL

#### 5.3.2 Modelo 2

A Figura 5.48 resume os resultados das simulações do Modelo 1 com a sobreposição dos critérios visuais com os consumos estimados.

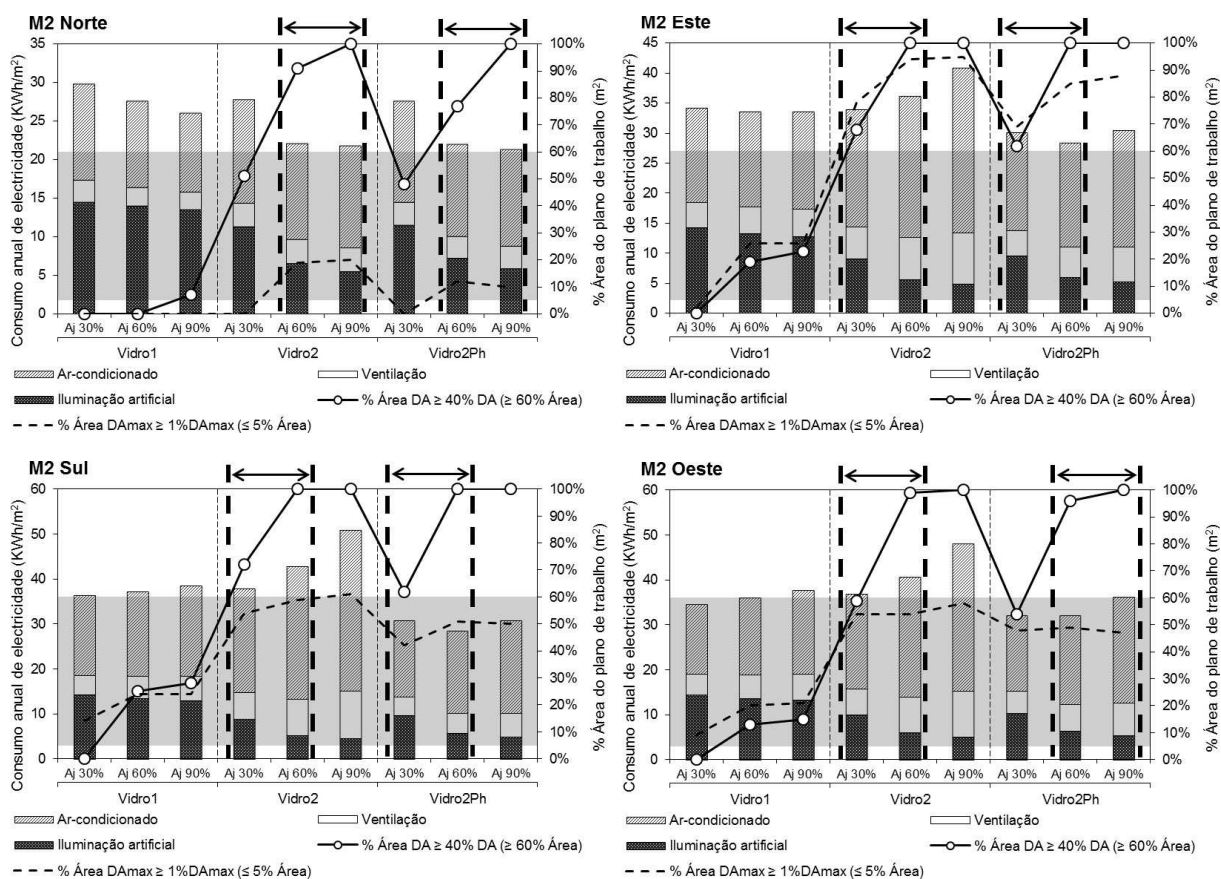


Figura 5.48: Soluções para o uso de energia, desempenho visual e conforto do escritório M2 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

Através da análise gráfica é possível definir quais as soluções mais adequadas. Casos que obrigatoriamente cumprem o critério de quantidade e uniformidade visual ocorrem a Norte: Aj60-90 com vidro 2 e Aj60-90 com vidro 2 e palas horizontais, a Sul e Este: Aj30-90 com V2 e Aj30-90 com V2Ph e a Oeste: Aj30-90 com V2 e Aj60-90 com V2Ph.

O espaço de soluções é delimitado pela intersecção entre o cumprimento de pelo menos um critério de conforto visual, de quantidade de luz e da região crítica em que a luz do dia não contribui para a poupança de iluminação artificial. A gama de valores para Norte: Aj60-90 com V2 e Aj60-90 com V2Ph, Sul e Este: Aj30-60 com V2 e Aj30-60 com V2Ph e a Oeste: Aj30-60 com V2 e Aj60-90 com V2Ph.

### 5.3.3 Modelo 3

A Figura 5.48 resume os resultados das simulações do Modelo 1 com a sobreposição dos critérios visuais com os consumos estimados.

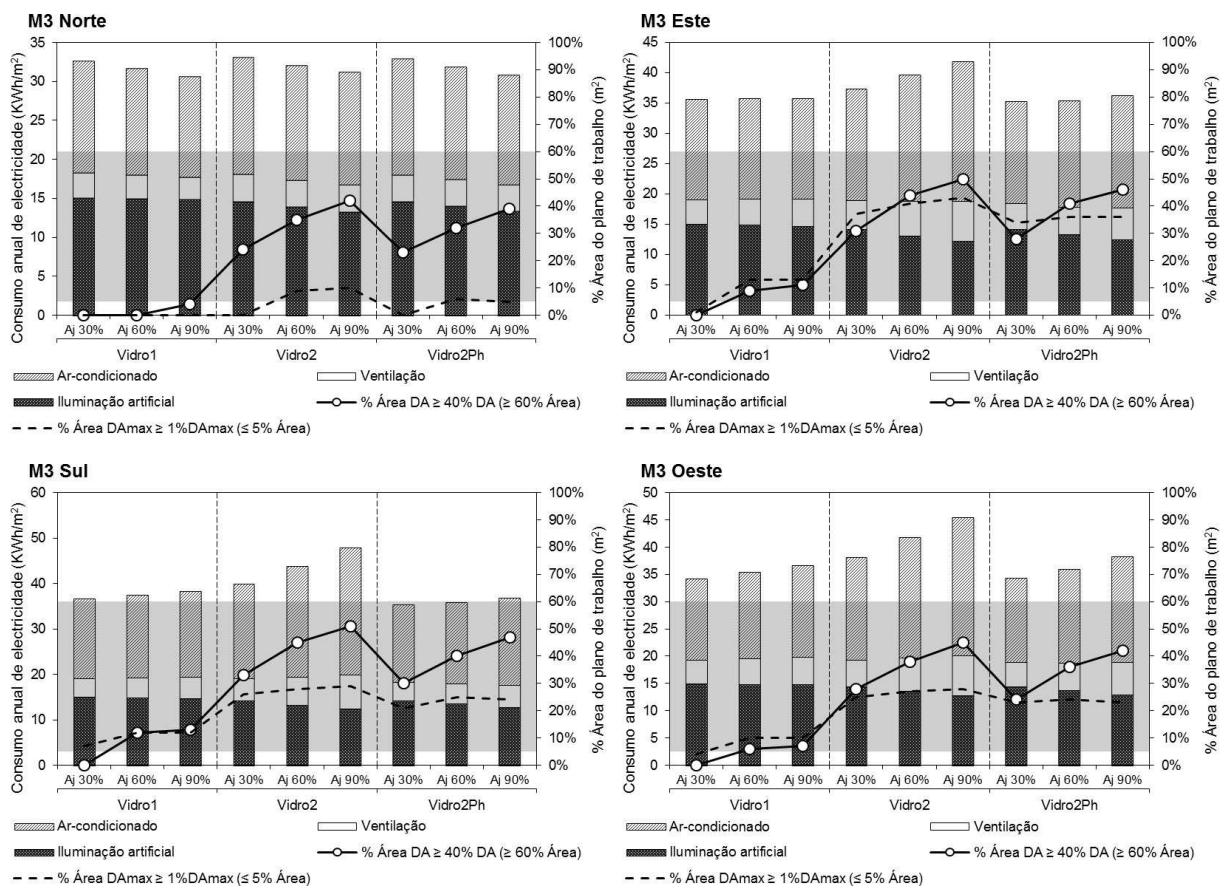


Figura 5.49: Soluções para o uso de energia, desempenho visual e conforto do escritório M3 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

Tal como já foi referido na Secção 5.1 os escritórios M3 devido à sua profundidade não cumprem o requisito de quantidade de luz com pelo menos  $500lx$  de iluminância em 40% do período de ocupação.

### 5.3.4 Conclusões da avaliação do desempenho energético e visual

Embora seja espectável que todos os critérios de aspecto visual sejam satisfeitos o critério de brilho em conjunto com o de quantidade não foi cumprido por praticamente nenhum dos espaços de solução, excepto nos casos M1Aj30V2N e M1Aj30V2PhN. No entanto, usando o critério de quantidade e uniformidade permitiu várias soluções válidas.

A tendência de consumo de energia demonstra que num clima temperado como o de Lisboa, grandes

### 5.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E VISUAL

áreas de janela tornam-se contraproducentes, uma vez que esta dispõe de mais superfície para a transferência de calor durante a estação de arrefecimento e aquecimento. Este facto constata-se com o aumento da demanda de energia com ar-condicionado e ventilação, sem redução significativa do consumo com iluminação artificial. No entanto, os tamanhos de janelas não podem ser reduzidos de forma arbitrária, pois o consumo de iluminação eléctrica tende a aumentar, juntamente com o decréscimo do conforto visual. Estes resultados são consistentes com os estudos de Mardaljevic *et al.* (2009), Ochoa *et al.* (2012).

Para obter uma solução óptima dado o universo de soluções é necessário introduzir mais parâmetros: (a) menor consumo de energia total, (b) vista para o exterior e (c) integração arquitectónica, entre outros. Se estes critérios se respeitarem dentro do espaço de soluções consegue-se um bom compromisso entre uma solução eficiente energeticamente e visualmente confortável.



## Capítulo 6

# Conclusões e considerações finais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre este trabalho, seguida das limitações e recomendações para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao estudo aprofundando alguns pontos abordados.

### 6.1 Conclusões

Ao longo deste trabalho aplica-se um método para avaliar a qualidade da luz interior e o consumo de energia eléctrica, quando se utiliza o aproveitamento da luz natural.

Para atingir este objectivo, utiliza-se ferramentas computacionais como o *EnergyPlus* e o *Daysim*. Na ferramenta *Energyplus* faz-se simulações termo-energéticas; já o *Daysim* é utilizado para simular a iluminação natural. O principal resultado das simulações no *EnergyPlus* é o consumo anual de electricidade.

Com a avaliação do comportamento da luz natural através das grandezas, *Daylight Autonomy (DA)* e *Daylight Autonomy maximum (DAMax)*, é possível identificar as diferenças nos resultados da iluminação natural entre os modelos com diferentes características. Os valores de DA permitiram identificar a percentagem de área que apresenta determinada autonomia da luz natural e o consumo com iluminação artificial necessário para complementar a iluminância estipulada para o período de ocupação. O aproveitamento da luz natural proporcionou uma redução de 20% a 83% no consumo de energia com iluminação artificial.

O impacto do aproveitamento da luz natural no consumo energético total pode ser avaliado através das simulações integradas. A análise é realizada essencialmente pelo consumo de energia com ar-condicionado, iluminação artificial e ventilação. O consumo com equipamentos é constante para todos os modelos, não interferindo nas análises. O uso do controlo do sistema de iluminação artificial, diante do aproveitamento da luz natural, proporcionou uma redução no consumo de energia com iluminação em todos os modelos e influenciou o comportamento do ar condicionado e ventilação, que teve seu consumo

reduzido devido a diminuição das cargas internas provenientes do sistema de iluminação artificial. A redução obtida no consumo final variou de 14% a 60%. O valor no consumo energético reduzido pela influência da luz natural, nos modelos que utilizam controlo do sistema de iluminação é possível de ser obtido através de comparações com o Modelo Base (MB), criado para servir de referência aos modelos de diferentes características, já que apresenta o sistema de iluminação artificial ligado de acordo com o perfil nominal do RCESE, sem nenhum controlo de iluminação do aproveitamento da luz natural.

Considera-se que o objectivo de aplicar uma metodologia que avalie a qualidade da luz natural e a eficiência energética em edificações com o aproveitamento da mesma é alcançado a partir da integração de diferentes programas de simulação computacional. Espero que este trabalho possa contribuir com informações acerca do desempenho luminoso e energético e servir de ponto de partida para a inclusão da iluminação natural na avaliação da eficiência energética de edificações não residenciais.

### 6.1.1 Grandezas dinâmicas de iluminação natural

Os modelos de escritórios simulados, representam vários exemplos de iluminação natural boa e má. A amplitude de exemplos ilustra a capacidade das grandezas dinâmicas para quantificar adequadamente a qualidade da luz natural.

Com a adaptação dos critérios desenvolvidos pelo movimento *Collaborative for High Performance Schools* (CHPS), é possível avaliar os escritórios segundo níveis de intensidade de DA. Nível de DA de 80% - 100% representam compartimentos com desempenho excelente, de 60% a 80% bons e de 40% a 60% adequados (Corporation, 2006). No entanto, maior quantidade de iluminação não significa melhor qualidade, daí a introdução do DAm<sub>ax</sub> como segundo avaliador. O DAm<sub>ax</sub> quantifica a quantidade de brilho e é tão importante para avaliar a iluminação natural como o DA. Por exemplo os escritórios com DA de 80% e um DAm<sub>ax</sub> elevado não podem ser considerados uma solução adequada de luz natural. O DAm<sub>ax</sub> ideal é de 0%, que representa os casos sem brilho e qualquer valor acima de 5% pode ser problemático.

Um dos critérios de conforto visual é a uniformidade que tem de ser alcançada por 60% da área do plano de trabalho e a exigência de que o DAm<sub>ax</sub> deve ser inferior a 5%, minimiza a probabilidade de ocorrência de brilho. As grandezas dinâmicas propostas são recomendadas para substituir o método do *Daylight Factor* (DF).

### 6.1.2 Ferramenta de simulação dinâmica de iluminação natural - *Daysim*

A utilização da ferramenta *Daysim*, permite a avaliação de variáveis arquitetónicas juntamente com as variáveis climáticas da região de Lisboa, sendo esta característica fundamental para os estudos na área de iluminação natural no contexto climático de Portugal.

Além disso, o programa *Daysim* mostra-se adequado para a simulação de iluminação natural dinâmica, permitindo verificar o comportamento da luz natural ao longo de um ano, com resultados apresentados em grandezas dinâmicas, como o *Daylight Autonomy*, que permite verificar em percentagem de horas o

## 6.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

atendimento da iluminância de projecto, auxiliando na identificação no nível de desempenho mínimo da luz natural.

O programa também permite a realização de inúmeras simulações em curtos períodos de tempo, dando resultados consideravelmente confiáveis de iluminância. De salientar que, o facto do programa possuir um manual completo e actualizado, possibilitou a resolução de diversas dúvidas o que facilitou o processo de simulação.

## 6.2 Considerações finais

Seguem algumas limitações encontradas na realização do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

### 6.2.1 Limitações do trabalho

Durante o desenvolvimento do trabalho foram encontradas algumas limitações. Na sua maioria estão relacionadas com impossibilidade de avaliar um maior número de modelos, já que a simulação da iluminação natural demora bastante tempo. O trabalho é limitado em relação a:

- Não considera a influência de sombra de eventuais edificações vizinhas na análise de iluminação natural nem no desempenho energético;
- Considera a acção dos ocupantes como sendo ideal, de modo a garantir o máximo de economia de energia eléctrica;
- Não considera a variação de diversos parâmetros como clima, cor das superfícies, propriedades térmicas dos materiais, pé-direito, tipos de esquadrias e inercias térmicas da edificação;
- Apenas são consideradas aberturas de janela de 30%, 60% e 90%.

### 6.2.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos e das limitações encontradas na realização deste trabalho, sugere-se alguns aspectos a serem investigados em trabalhos futuros:

- Aprofundar o estudo do impacto das variações geométricas no consumo de energia, alterando profundidade, largura e altura, além de variações na quantidade e posições das aberturas;
- Analisar qualidade da iluminação natural e consumos de energia eléctrica através da exploração de modelos comportamentais para o controlo de cortinas, iluminação artificial e protecções solares;
- Aplicar a metodologia utilizada noutras zonas climáticas, com o intuito de estudar o comportamento e a influência da luz natural na redução do consumo de energia em diferentes regiões de Portugal;

## *CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS*

- Estudar o efeito da percepção da qualidade da luz interior com diferentes tipos de vidro;
- Dimensionamento da área ideal de janela tendo em conta aspectos térmicos, qualidade da iluminação natural e qualidade da vista para o exterior;
- Dimensionamento da área ideal de janela tendo em conta aspectos térmicos, qualidade da iluminação natural e a qualidade do ar interior com o uso de ventilação artificial e ventilação híbrida;
- Dimensionamento da área ideal de janela tendo em conta aspectos térmicos, qualidade da iluminação natural, qualidade do ar interior com o uso de ventilação artificial e ventilação híbrida e acústica;
- Influência de vários tipos de sombreamentos exteriores na propagação da iluminação.

# Bibliografia

- ACHARD, G., LAFORGUE, P. & SOUYRI, B. (1997). Evaluation of radiative comfort in office buildings. *Proceedings of Clima 2000 Conference* .
- ADENE (2011). Perguntas & respostas sobre o rsece – energia. Tech. rep., Adene – Agência para a energia.
- ALBISTUR, R. & AROZTEGUI, J. (1985). *Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural*. D.C. Luzzato.
- ANDRÉ, E. T. P. (s.d.). Iluminação e ambiente cromático. URL <http://www.prof2000.pt/users/eta/Iluminacao.htm>. [Consultado 22/02/2012].
- ANSI/ASHRAE-140 (2004). Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs – standard 140-2004. (ANSI Approved).
- ARQUITECTOS, O. D. (2001). *A Green Vitruvius: Principios e Práticas de Projecto para uma Arquitectura Sustentável*. Ordem dos Arquitectos.
- ASCHEHOUG, Ø., CHRISTOFFERSEN, J., JAKOBIAK, R., JOHNSEN, K., LEE, E., RUCK, N., SELKOWITZ, S., INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, S. H., IEA & COOLING PROGRAMME, T. . E. C. I. B. . C. S. E. P. A. ., SHC (2000). *Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components. A Report of IEA SHC Task 21, ECBCS Annex 29*. International Energy Agency, IEA, Solar Heating and Cooling Programme, SHC, Energy Conservation in buildings and Community Systems Programme.
- AUTODESK, I. (s.d.). Autodesk ecotec analysis 2011. URL <http://usa.autodesk.com/ecotect-analysis/>. [Consultado 06/09/2012].
- BAKER, N., FANCHIOTTI, A. & STEEMERS, K. (1993). *Daylighting in Architecture: A European Reference Book*. Earthscan.
- BAKER, N. & STEEMERS, K. (2002). *Daylight Design of Buildings*. James & James.
- BALLAST, D. (1988). *Architect's handbook of formulas, tables, and mathematical calculations*. Prentice Hall, Business & Professional Division.
- BOKEL, R. (2007). The effect of window position and window size on the energy demand for heating, cooling and electric lighting. *Building Simulation 2007* , 117 – 121.

- BOURGEOIS, D., REINHART, C. & MACDONALD, I. (2006). Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and Buildings* **38**, 814 – 823.
- CANADA, N. R. C. & THE FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (s.d.). Daysim version 2.1. URL <http://www.daysim.com/>. [Consultado 06/09/2012].
- CARMODY, J. (2007). *Residential Windows: A Guide to New Technologies and Energy Performance*. W.W. Norton.
- CARTAS, J. F. D. N. (2011). *Simulação dinâmica de um edifício de escritórios com os programas EnergyPlus e Trace 700*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico – IST.
- CIE (1994). Spatial distribution of daylight: Luminance distribution of various reference skies. Tech. rep., Commission Internationale de L'éclairage (CIE).
- CINTRA, M. S. (2011). *Arquitetura e Luz Natural: A influência da profundidade de ambientes em edificações residenciais*. Master's thesis, Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.
- COELHO, A. L. (1989). *Articulação da iluminação natural com a iluminação artificial: contribuição para a caracterização do clima luminoso do país*. Master's thesis, Universidade do Porto, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- CORPORATION, A. E. (2006). Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool. *CHPS Daylighting Committee*.
- CORPORATION, K. (2012). Daylight modeling. URL <http://www.daylightmodeling.com/daylight.htm>. [Consultado 23-08-2012].
- COUTINHO, M. S. (2009). *Avaliação das condições de Iluminação Natural através de Simulações em Modelos Virtuais: O Estudo de Caso da Reitoria da Universidade Nova de Lisboa*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico – IST.
- CRAWLEY, D. B., PEDERSEN, C. O., LIESEN, R. J., FISHER, D. E., STR, R. K., TAYLOR, R. D., LAWRIE, L. K., WINKELMANN, F. C., BUHL, W. F., ERDEM, A. E. & HUANG, Y. J. (1999). Energyplus: A new-generation building energy simulation program. *Renewable and Advanced Energy Systems for the 21st Century*.
- CRUZ, P. J. S. & PEQUENO, J. (2005). Vidro na arquitetura. *Arte & Construção* **181**, 48 – 53.
- CUNHA, M. M. F. D. (2005). *Vãos envidraçados: Geometria de insolação - Optimização do dimensionamento de elementos de protecção solar*. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP.
- DIDONÉ, E. L. (2009). *A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC*. Master's thesis, Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC.
- DLN<sup>o</sup>327 (2001). Decreto-lei nº 327/2001. Lisboa: Diário da República.
- DLN<sup>o</sup>79 (2006). Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (rsece) – decreto-lei nº79/2006. Lisboa: Diário da República.

## BIBLIOGRAFIA

- DLN<sup>o</sup>80 (2006). Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (rccte) – decreto-lei n<sup>o</sup> 80/2006. Lisboa: Diário da República.
- EDITORA, P. (2003-2012). Crise mundial dos anos 70. in infopédia. URL [http://www.infopedia.pt/\\$crise-mundial-dos-anos-70](http://www.infopedia.pt/$crise-mundial-dos-anos-70). [Consultado 20/01/2012].
- EGAN, M. & OLGAY, V. (2002). *Architectural lighting*. McGraw-Hill.
- EN12464-1 (2002). Light and lighting - lighting of work places - part 1: Indoor work places.
- ENERGY, U. S. D. O. (s.d.). Energyplus version 7.1. URL <http://www.energyplus.gov/>. [Consultado 06/09/2012].
- FERNANDES, R. F. D. C. (2008). *Eficiência Energética de Edifícios versus Qualidade de Iluminação*. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP.
- GLASSNER, A. (1989). *An Introduction to Ray Tracing*. Acad. Press.
- GOODMAN, T. (2009). Measurement and specification of lighting: A look at the future. *Lighting Research and Technology* **41**, 229 – 243.
- GOOGLE (s.d.). Google sketchup pro versão 8.0.4811. URL <http://sketchup.google.com/intl/en/>. [Consultado 06/09/2012].
- HONG, T., CHOU, S. & BONG, T. (2000). Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and Environment* **35**, 347 – 361.
- HOPKINSON, R., PETHERBRIDGE, P. & LONGMORE, J. (1966). *Daylighting*. Heinemann.
- JOHNSON, R., SULLIVAN, R., SELKOWITZ, S., CONNER, C. & ARASTEH, D. (1984). Glazing energy performance and design optimization with daylighting. *Energy Build* **6**, 305 – 317.
- KJENNER, J. (s.d.). Su2ds. URL <http://code.google.com/p/su2ds/>. [Consultado 06/09/2012].
- LABORATORY, N. R. E. (s.d.). Openstudio google sketchup plug-in versão 0.80. URL <http://openstudio.nrel.gov>. [Consultado 06/09/2012].
- LOVE, J. A. (1990). *The vertical-to-horizontal illuminance ratio: Development of a new indicator of daylighting performance*. University of Michigan.
- MARDALJEVIC, J. (2006). Examples of climate-based daylight modelling. *CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future* .
- MARDALJEVIC, J., HESCHONG, L. & LEE, E. (2009). Daylight metrics and energy savings. *Lighting Research & Technology* **41**(3), 261 – 283.
- MARSH, D. A. (2003). Computer-optimised shading design. *Eighth International IBPSA Conference* .
- MAX (2012). An overview of daylighting metrics, with examples. fenestration & debauchery. URL <http://www.maxwellrosspierson.com/2012/05/19/an-overview-of-daylighting-metrics-with-examples/>. [Consultado 25/10/2012].
- MOORE, F. (1991). *Concepts and practice of architectural daylighting*. Van Nostrand Reinhold.

- NABIL, A. & MARDALJEVIC, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology* **37**, 41 – 59.
- NABIL, A. & MARDALJEVIC, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings* **38**, 905 – 913.
- OCHOA, C. E., ARIES, M. B., VAN LOENEN, E. J. & HENSEN, J. L. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied Energy* **95**, 238 – 245.
- OLGYAY, V. & OLGAY, A. (1963). *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press.
- OSRAM (2000). Manual luminotécnico prático. Tech. rep., Osram.
- PALHINHA, M. S. D. J. (2009). *Sistemas de Sombreamento em Arquitetura: Proposta de um novo método de concepção e dimensionamento*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico – IST.
- PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J. & STEWART, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* **44**, 271 – 289.
- PEREZ, R., SEALS, R. & MICHALSKY, J. (1993). All-weather model for sky luminance distribution – preliminary configuration and validation. *Solar Energy* **50**(3), 235 – 245.
- PEREZ, R., WEBSTER, K., SEALS, R., STEWART, R. & BARRON, J. (1987). Variations of the luminous efficacy of global and diffuse radiation and zenith luminance with weather conditions – description of a potential method to generate key daylight availability data from existing solar radiation data bases. *Solar Energy* **38**, 33 – 44.
- PHILIPS (2012). Catálogo de produtos 2012. URL <http://www.ecat.lighting.philips.pt/1/>. [Consultado 12/02/2012].
- PINHEIRO, M. D. (2006). *Ambiente e construção sustentável*. Instituto do Ambiente.
- PROGRAM, L. B. N. L. B. T. (1997). *Tips for Daylighting with Windows*. The Program.
- RAMOS, G. (2008). *Análise da iluminação natural calculada por meio do programa EnergyPlus*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- RAMOS, G. & GHISI, E. (2010). Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa energyplus. *Ambiente Construído* **10**, 157 – 169.
- REINHART, C. (2005). A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylit zone depth rule-of-thumb. *Building Simulation 2005*, 1011 – 1018.
- REINHART, C., MORRISON, M. & DUBROUS, F. (2003). The lightswitch wizard – reliable daylight simulations for initial design investigation. *Buildings Simulation 2003* **3**, 1093 – 1100.
- REINHART, C. F. (2004). Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy* **77**(1), 15 – 28.
- REINHART, C. F. (2010). Tutorial on the use of daysim simulations for sustainable design. Tech. rep., Harvard University, Graduate School of Design.

## BIBLIOGRAFIA

- REINHART, C. F., MARDALJEVIC, J. & ROGERS, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos* **3**, 1 – 25.
- REINHART, C. F. & WIENOLD, J. (2011). The daylighting dashboard – a simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment* **46**, 386 – 396.
- ROGERS, D. (1985). *Procedural elements for computer graphics*. McGraw-Hill.
- RUPP, R. F. (2011). *Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida*. Master's thesis, Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC.
- S.A. (1999). The radiance 3.5: Synthetic imaging system . Tech. rep., Building Technologies Department, Lawrence Berkeley Laboratory.
- SANTOS, C. A. P. D. & MATIAS, L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios Versão actualizada 2006*. LNEC.
- SARGENT, J., NIEMASZ, J. & REINHART, C. F. (2011). Shaderade: Combining rhinoceros and energyplus for the design of static exterior shading devices. *Building Simulation 2011* .
- SAXENA, M. (2008). A new & better way to calculate daylight. URL <http://www.buildings.com/tabid/3334/ArticleID/6340/Default.aspx>. [Consultado 23/09/2012].
- SIRGADO, J. F. D. C. (2010). *Análise do impacte dos vãos envidraçados no desempenho térmico dos edifícios*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico – IST.
- SOUZA, M. B. D. (2003). *Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para a economia de energia eléctrica*. Master's thesis, Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC.
- TEIXEIRA, E. W. (s.d.). Método dos lumens. URL [http://www.luz.philips.com/latam/archives/metodo\\_lumens.htm](http://www.luz.philips.com/latam/archives/metodo_lumens.htm). [Consultado 12/02/2012].
- TREGENZA, P. R. & WATERS, I. M. (1983). Daylight coefficients. *Lighting Research and Technology* **15**(2), 65 – 71.
- UE, U. E. (2004). Para uma estratégia temática sobre ambiente urbano. comunicação da comissão ao conselho, ao parlamento europeu, ao comité económico e social europeu e ao comité das regiões. Tech. rep.
- VAN BOMMEL, W. J. (2006). Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. *Applied Ergonomics* **37**, 461 – 466.
- VERSAGE, R., MELO, A. P. & LAMBERTS, R. (2010). Impact of different daylighting simulation results on the prediction of total energy consumption. *SimBuild 2010* .
- VIANNA, N. & GONÇALVES, J. (2001). *Iluminação e arquitetura*. Virtus.
- WALLACE, J. R., COHEN, M. F. & GREENBERG, D. P. (1987). A two-pass solution to the rendering equation: A synthesis of ray tracing and radiosity methods. *SIGGRAPH Comput. Graph.* **21**(4), 311–320.

WATT, A. (2000). *3D computer graphics*. Addison-Wesley.

WIKIPÉDIA (2009). Luminância. URL <http://pt.wikipedia.org/wiki/Luminância>. [Consultado 06/11/2012].

WIKIPÉDIA (2011). Ângulo sólido. URL [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ângulo\\_sólido](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ângulo_sólido). [Consultado 06/11/2012].

WIKIPÉDIA (2012a). Fluxo luminoso. URL [http://pt.wikipedia.org/wiki/Fluxo\\_luminoso](http://pt.wikipedia.org/wiki/Fluxo_luminoso). [Consultado 06/11/2012].

WIKIPÉDIA (2012b). Iluminância. URL <http://pt.wikipedia.org/wiki/Iluminância>. [Consultado 06/11/2012].

## Apêndice A

# Projecto luminotécnico

O projecto luminotécnico visa dimensionar a densidade de iluminação capaz de debitar  $500lx$  no plano de trabalho. É utilizado luminárias de duas lâmpada fluorescente tubular TL5 de 28W. O número de luminárias e de lâmpadas variou de acordo com o tamanho do ambiente. O processo de dimensionamento encontra-se descrito no Quadro A.3, Quadro A.4, e Quadro A.5.

### A.1 Escolha de luminária

*Quadro A.1:* Especificações técnicas do conjunto lâmpada-luminária utilizada no projeto luminotécnico Philips (2012).

Código comercial Philips	Potência (W)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Temperatura cor (K)
TCS260 2x28W/840 HFP C6 WH	28	2600	97	4000



*Figura A.1:* Luminária Philips: TCS260 2x28W Philips (2012).

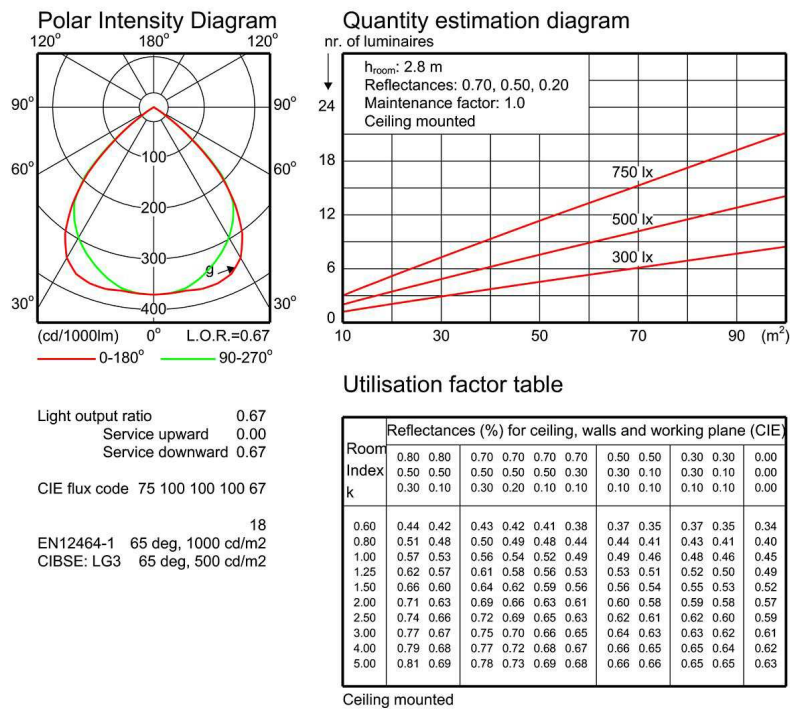


Figura A.2: Abaco luminária Philips: TCS260 2x28W Philips (2012).

## A.2 Factor de manutenção

Com o tempo, paredes e tecto ficarão sujos. Os equipamentos de iluminação acumularão poeira e as lâmpadas fornecerão menor quantidade de luz. Alguns desses efeitos poderão ser eliminados por manutenção. O factor de manutenção tem em atenção a diminuição do rendimento das armaduras e das lâmpadas com o tempo. Para atenuar o efeito desses factores, admite-se uma boa manutenção periódica, adoptando o valor de factor de manutenção de acordo com o Quadro A.2.

Quadro A.2: Obtenção do factor de manutenção Teixeira (s.d.).

Ambiente	Período de manutenção		
	2500 hs	5000 hs	7500 hs
Limpo	0,95	0,91	0,88
Normal	0,91	0,85	0,80
Sujo	0,80	0,66	0,57

## A.3 Cálculo luminotécnico

### A.3. CÁLCULO LUMINOTÉCNICO

Quadro A.3: Cálculo de iluminação interna para o Modelo 1 (Adaptado de Osram, 2000).

		Modelo 1		
Descrição do ambiente	Comprimento	$a$	$m$	4
	Largura	$b$	$m$	8
	Área	$A = a.b$	$m^2$	32
	Pé-direito	$H$	$m$	2,7
	Altura do plano de trabalho em relação ao piso	$h_{pltr}$	$m$	0,8
	Pé-direito útil	$h = H - h_{pltr}$	$m$	1,9
	Factor de área	$K = \frac{a.b}{h(a+b)}$	-	1,4
	Factor de manutenção	$Fd$	-	0,80
	Coefficiente de reflexão teto	$\rho_1$	-	0,70
	Coefficiente de reflexão paredes	$\rho_2$	-	0,50
	Coefficiente de reflexão piso	$\rho_3$	-	0,20
	Características da iluminação	Nível de iluminação estipulado	$Em$	$lx$
Tonalidade ou temperatura da cor				Branca fria
Índice de reprodução de cores		$IRC$	-	85
Lâmpadas e luminárias	Tipo de lâmpada		-	TL5-28W HFP C6
	Fluxo luminoso de cada lâmpada	$\Phi$	$lm$	2600
	Lâmpadas por luminária	$z$	$unid$	2
	Tipo de luminária		-	TCS260 2x28W
	Factor de fluxo luminoso		-	1
	Factor de utilização	$Fu$	-	0,604
	Quantidade de lâmpadas	$n = \frac{Em.A.Fd}{\Phi.Fu}$	$unid$	8
	Quantidade de luminárias	$N = n/z$	$unid$	4
Cálculo de controlo	Quantidade de luminárias na instalação	$Ni$	$unid$	4
	Iluminação média alcançada	$E = \frac{z.Ni.\Phi.Fu}{A.Fd}$	$lx$	490,75
Consumo da instalação	Potência total instalada	$Pt = \frac{ni.W}{1000}$	$Kw$	0,224
	Densidade da potência	$D = \frac{Pt.1000}{A}$	$W/m^2$	7
	Densidade da potência relativa	$Dr = \frac{D.100}{E}$	$W/m^2$ $p/100lx$	1,43

APÊNDICE A. PROJECTO LUMINOTÉCNICO

Quadro A.4: Cálculo de iluminação interna para o Modelo 2 (Adaptado de Osram, 2000).

Modelo 2				
Descrição do ambiente	Comprimento	$a$	$m$	8
	Largura	$b$	$m$	8
	Área	$A = a.b$	$m^2$	64
	Pé-direito	$H$	$m$	2,7
	Altura do plano de trabalho em relação ao piso	$h_{pltr}$	$m$	0,8
	Pé-direito útil	$h = H - h_{pltr}$	$m$	1,9
	Factor de área	$K = \frac{a.b}{h(a+b)}$	-	2,11
	Factor de manutenção	$Fd$	-	0,80
	Coefficiente de reflexão teto	$\rho_1$	-	0,70
	Coefficiente de reflexão paredes	$\rho_2$	-	0,50
	Coefficiente de reflexão piso	$\rho_3$	-	0,20
	Características da iluminação	Nível de iluminação estipulado	$Em$	$lx$
Tonalidade ou temperatura da cor				Branca fria
Índice de reprodução de cores		$IRC$	-	85
Lâmpadas e luminárias	Tipo de lâmpada		-	TL5-28W HFP C6
	Fluxo luminoso de cada lâmpada	$\Phi$	$lm$	2600
	Lâmpadas por luminária	$z$	$unid$	2
	Tipo de luminária		-	TCS260 2x28W
	Factor de fluxo luminoso		-	1
	Factor de utilização	$Fu$	-	0,667
	Quantidade de lâmpadas	$n = \frac{Em.A.Fd}{\Phi.Fu}$	$unid$	15
	Quantidade de luminárias	$N = n/z$	$unid$	7,5
Cálculo de controlo	Quantidade de luminárias na instalação	$Ni$	$unid$	8
	Iluminação média alcançada	$E = \frac{z.Ni.\Phi.Fu}{A.Fd}$	$lx$	541,94
Consumo da instalação	Potência total instalada	$Pt = \frac{ni.W}{1000}$	$Kw$	0,448
	Densidade da potência	$D = \frac{Pt.1000}{A}$	$W/m^2$	7
	Densidade da potência relativa	$Dr = \frac{D.100}{E}$	$W/m^2$ $p/100lx$	1,29

### A.3. CÁLCULO LUMINOTÉCNICO

Quadro A.5: Cálculo de iluminação interna para o Modelo 3 (Adaptado de Osram, 2000).

Modelo 3				
Descrição do ambiente	Comprimento	$a$	$m$	16
	Largura	$b$	$m$	8
	Área	$A = a.b$	$m^2$	128
	Pé-direito	$H$	$m$	2,7
	Altura do plano de trabalho em relação ao piso	$h_{pltr}$	$m$	0,8
	Pé-direito útil	$h = H - h_{pltr}$	$m$	1,9
	Factor de área	$K = \frac{a.b}{h(a+b)}$	-	2,81
	Factor de manutenção	$Fd$	-	0,80
	Coeficiente de reflexão teto	$\rho_1$	-	0,70
	Coeficiente de reflexão paredes	$\rho_2$	-	0,50
	Coeficiente de reflexão piso	$\rho_3$	-	0,20
	Características da iluminação	Nível de iluminação estipulado	$Em$	$lx$
Tonalidade ou temperatura da cor				Branca fria
Índice de reprodução de cores		$IRC$	-	85
Lâmpadas e luminárias	Tipo de lâmpada		-	TL5-28W HFP C6
	Fluxo luminoso de cada lâmpada	$\Phi$	$lm$	2600
	Lâmpadas por luminária	$z$	$unid$	2
	Tipo de luminária		-	TCS260 2x28W
	Factor de fluxo luminoso		-	1
	Factor de utilização	$Fu$	-	0,696
	Quantidade de lâmpadas	$n = \frac{Em.A.Fd}{\Phi.Fu}$	$unid$	28
	Quantidade de luminárias	$N = n/z$	$unid$	14
Cálculo de controlo	Quantidade de luminárias na instalação	$Ni$	$unid$	16
	Iluminação média alcançada	$E = \frac{z.Ni.\Phi.Fu}{A.Fd}$	$lx$	565,50
Consumo da instalação	Potência total instalada	$Pt = \frac{ni.W}{1000}$	$Kw$	0,896
	Densidade da potência	$D = \frac{Pt.1000}{A}$	$W/m^2$	7
	Densidade da potência relativa	$Dr = \frac{D.100}{E}$	$W/m^2$ $p/100lx$	1,24

## A.4 Distribuição das armaduras

Distribuição das armaduras no caso da resultante do cálculo não ser compatível com a distribuição pretendida, recomenda-se sempre o acréscimo de luminárias e não a eliminação, para que não haja prejuízo do nível de iluminância projectado.

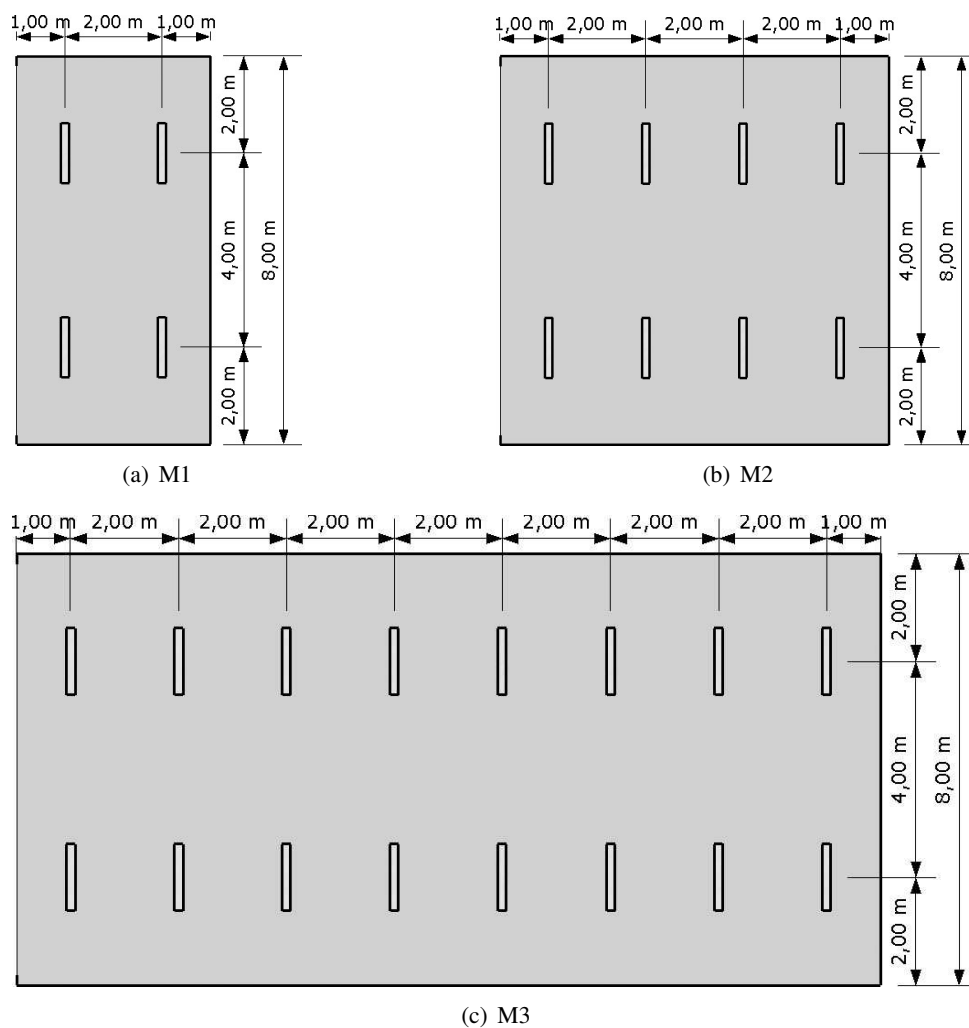


Figura A.3: Distribuição das luminárias.

## Apêndice B

# Relatório do Daysim

Em cada simulação o Daysim produz um relatório com valores em grandezas de análise da luz natural para cada ponto da malha definida no plano de trabalho, identificados por coordenadas (x, y e z). As grandezas fornecidas são as seguintes: *Daylight Factor* (DF), *Daylight Autonomy* (DA), *Continuous Daylight Autonomy* (DA<sub>con</sub>), *Daylight Autonomy maximum* (DA<sub>max</sub>), *Useful Daylight Illuminances* (UDI). Há também a informação sobre a Exposição anual de luz (annual light exposure) que é o montante de luz incidente visível acumulado ao longo de um ano, expresso em *lx* horas por ano.

DAYSIM Simulation Output

### Daysim Simulation Report

**Warning:** No core workplane sensors have been selected. Daysim will therefore interpret all illuminance sensors as workplane sensors, i.e. Daysim assumes that the core workplane extends over all illuminance sensors in your lighting zone. (Note: To select a work plane sensor, go to ANALYSIS>>'SPECIFY WORKPLANE'.)

### In short...

- **Daylight Factor (DF) Analysis:** 55% of all illuminance sensors have a daylight factor of 2% or higher. If the sensors are evenly distributed across 'all spaces occupied for critical visual tasks', the investigated lighting zone would not qualify for the LEED-NC 2.1 daylighting credit 8.1 as the area ratio of sensors with a daylight factor over 2% would need to be 75% or higher (see [www.usgbc.org/LEED/](http://www.usgbc.org/LEED/)).
- **Daylight Autonomy (DA) Analysis:** The daylight autonomies for all core workplane sensors lie between 50% and 96% .
- **Useful Daylight Index (UDI) Analysis:** The Useful Daylight Indices for the Lighting Zone are UDI<sub><100</sub>=8%, UDI<sub>100-2000</sub>=2%, UDI<sub>>2000</sub>=90% .
- **Continuous Daylight Autonomy (DA<sub>con</sub>) and DA<sub>max</sub> Analysis:** 100% of all illuminance sensors have a DA<sub>con</sub> above 80% . 37% of all illuminance sensors have a DA<sub>max</sub> above 5% .
- **Electric Lighting Use:** The predicted annual electric lighting energy use in the investigated lighting zone is: 23.4 kWh/unit area. Assuming a lighting zone size of 64 [unit area], this corresponds to a total annual lighting energy use of 1495.1 kWh.

*Figura B.1:* Exemplo de relatório do *Daysim* no caso M1Aj60V2PhS: Resumo.

DAYSIM Simulation Output

**Simulation Assumptions**

Site Description: The investigated building is located in Lisboa\_PRT (38.73 N/ 9.15 E). Daylight savings time lasts from April 1st to October 31st.

User Description: The zone is occupied Monday through Friday from 8:00 to 18:00. The occupant leaves the office three times during the day (30 minutes in the morning, 1 hour at midday, and 30 minutes in the afternoon). The total annual hours of occupancy at the work place are 2067.3. The electric lighting is activated 2154.0 hours per year. The occupant performs a task that requires a minimum illuminance level of 500 lux. The coordinates of core work place sensors are marked in **blue** in the table below. (Core workplane sensors indicate where occupants are usually located within a lighting zone, e.g. a desk in an office.)

The predicted annual electric lighting energy use of 23.4 kWh/unit area corresponds to the mean energy use in an ensemble of identical offices that are occupied by four user types:

- a user who operates the electric lighting in relation to ambient daylight conditions, opens the blinds in the morning (upon arrival), and lowers them when direct sunlight above 50 Wm<sup>-2</sup> hits the seating position (to avoid direct glare),
- a user who operates the electric lighting in relation to ambient daylight conditions, and keeps the blinds lowered throughout the year to avoid direct sunlight,
- a user who keeps the electric lighting on throughout the working day, opens the blinds in the morning (upon arrival), and lowers them when direct sunlight above 50 Wm<sup>-2</sup> hits the seating position (to avoid direct glare), and
- a user who keeps the electric lighting on throughout the working day, and keeps the blinds lowered throughout the year to avoid direct sunlight.

Lighting and Blind Control: The electric lighting system has an installed lighting power density of 7.00 W/unit area and is automatically controlled via an on/off occupancy sensor with a delay time of 5 minutes. The dimming system has an ideally commissioned photocell control with a ballast loss factor of 20.00 percent. The lighting system has a total standby power of 2.00W per unit area. The office has no dynamic shading device system installed.

Scene Visualization: The figure below shows a visualization of the building model.

Figura B.2: Exemplo de relatório do Daysim no caso M1Aj60V2PhS: Pressupostos.

DAYSIM Simulation Output

**Detailed Simulation Results**

The table below shows the daylight factor and various dynamic daylight performance metrics for all sensor points individually. Definitions of these quantities are provided in chapter one of the Daysim Tutorial. To guide the reader's eye, the following color code is used:

- Coordinates of core workplane sensors are shown in **blue**.
- Daylight factor levels over 2% are shown in **green**.
- Annual light exposure levels of medium and high sensitivity (CIE Categories III and IV) are shown in **dark green** and **light green**.

x	y	z	DF [%]	DA [%]	DA <sub>con</sub> [%]	DA <sub>max</sub> [%]	UDI <sub>&lt;100</sub> [%]	UDI <sub>100-2000</sub> [%]	UDI <sub>&gt;2000</sub> [%]	DSP [%]	annual light exposure [luxh]
0.250	0.250	0.800	10.5	94	96	33	3	18	79	0	30028612
0.250	0.750	0.800	28	94	96	28	3	18	79	0	25389056
0.250	1.250	0.800	27	93	95	22	3	24	73	4	22803282
0.250	1.750	0.800	12	92	95	15	4	33	63	32	14644530
0.250	2.250	0.800	10	91	94	13	4	51	45	46	12595167
0.250	2.750	0.800	14	90	94	7	4	68	30	70	8359546
0.250	3.250	0.800	27	88	93	3	4	76	20	81	6212745
0.250	3.750	0.800	11	85	91	2	5	83	12	92	4892053
0.250	4.250	0.800	1.9	83	91	2	5	84	11	83	4609819
0.250	4.750	0.800	1.6	80	90	0	5	89	6	92	3524022
0.250	5.250	0.800	1.4	75	88	0	6	94	1	91	2913678
0.250	5.750	0.800	1.3	71	87	0	6	94	0	89	2845978
0.250	6.250	0.800	1.1	62	84	0	7	93	0	87	2329879
0.250	6.750	0.800	1.0	53	81	0	7	93	0	84	2042996
0.250	7.250	0.800	1.0	55	82	0	7	93	0	85	2093849
0.750	0.250	0.800	1.2	96	97	65	3	8	89	0	45780008
0.750	0.750	0.800	12.4	95	96	45	3	12	85	0	33267222
0.750	1.250	0.800	11	94	96	27	3	18	79	0	26580858
0.750	1.750	0.800	10	93	95	18	3	27	70	19	19285642
0.750	2.250	0.800	6	91	95	12	4	40	56	43	13004421
0.750	2.750	0.800	1.9	90	94	6	4	63	33	70	8374851
0.750	3.250	0.800	2.8	88	93	3	4	76	20	83	6158342
0.750	3.750	0.800	1.9	86	92	2	4	81	15	84	5402096
0.750	4.250	0.800	2.0	84	91	2	5	85	10	84	4579243
0.750	4.750	0.800	1.6	80	90	0	5	91	4	92	3435309
0.750	5.250	0.800	1.5	76	88	0	5	93	2	91	2995101
0.750	5.750	0.800	1.2	68	86	0	6	94	0	89	2550152
0.750	6.250	0.800	1.1	66	85	0	6	94	0	88	2437691
0.750	6.750	0.800	1.0	58	83	0	7	93	0	86	2185256
0.750	7.250	0.800	1.0	56	82	0	7	93	0	85	2138754
1.250	0.250	0.800	17.2	96	97	66	3	8	89	0	45145378
1.250	0.750	0.800	13.7	96	96	55	3	9	88	0	37122092
1.250	1.250	0.800	15	95	96	32	3	14	83	0	28976946
1.250	1.750	0.800	17	93	95	20	3	23	74	6	17809934
1.250	2.250	0.800	16	92	95	15	4	36	60	34	14586285
1.250	2.750	0.800	19	90	94	6	4	56	40	68	8745370
1.250	3.250	0.800	11	89	93	2	4	72	24	84	6527452
1.250	3.750	0.800	25	87	92	2	4	80	16	84	5522450
1.250	4.250	0.800	1.8	84	91	1	5	84	11	85	4720755
1.250	4.750	0.800	1.8	82	90	0	5	90	5	93	3683471
1.250	5.250	0.800	1.5	77	89	0	5	93	2	92	3144299
1.250	5.750	0.800	1.3	71	87	0	6	94	0	89	2696700
1.250	6.250	0.800	1.2	66	86	0	6	94	0	88	2470009
1.250	7.250	0.800	1.0	56	82	0	7	93	0	82	2124750
1.250	7.750	0.800	1.1	60	84	0	7	93	0	86	2259175
1.750	0.250	0.800	16.6	96	96	67	3	9	88	0	45172100
1.750	0.750	0.800	13.7	96	96	57	3	8	89	0	36791180
1.750	1.250	0.800	15	95	96	36	3	12	85	0	31610372
1.750	1.750	0.800	17	94	96	21	3	19	78	0	18597246
1.750	2.250	0.800	14	92	95	17	3	32	65	27	15876389
1.750	2.750	0.800	11	91	94	6	4	50	46	67	8987035
1.750	3.250	0.800	12	89	93	2	4	71	25	85	6534631
1.750	3.750	0.800	15	86	92	2	4	80	16	86	5389117
1.750	4.250	0.800	1.2	85	92	1	4	83	13	86	4953848
1.750	4.750	0.800	1.8	82	90	0	5	90	5	93	3712304
1.750	5.250	0.800	1.5	76	89	0	5	93	2	91	3079807

Figura B.3: Exemplo de relatório do Daysim no caso M1Aj60V2PhS: Resultados detalhados.

## Apêndice C

# Padrões de referência de utilização dos edifícios

Padrões de referência para a tipologia escritórios adaptado no DLn<sup>o</sup>79 (2006). Estes padrões nominais são as condições interiores de referência (temperatura e humidade) e os parâmetros definidos para diferentes tipologias de edifício no Anexo XV do regulamento nomeadamente perfis variáveis, perfis constantes e densidades (ocupação, equipamentos) (Adene, 2011).

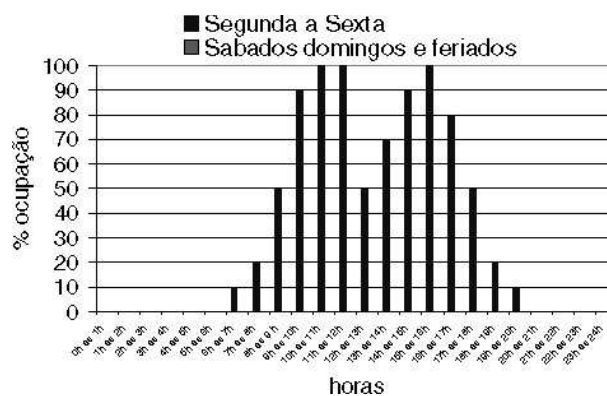


Figura C.1: Perfil de ocupação.

APÊNDICE C. PADRÕES DE REFERÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS

Quadro C.1: Perfil de ocupação.

horas	% de ocupação		horas	% de ocupação	
	Segunda a sexta	Fins de semana		Segunda a sexta	Fins de semana
0h – 1h	0	0	12h – 13h	50	0
1h – 2h	0	0	13h – 14h	70	0
2h – 3h	0	0	14h – 15h	90	0
3h – 4h	0	0	15h – 16h	100	0
4h – 5h	0	0	16h – 17h	80	0
5h – 6h	0	0	17h – 18h	50	0
6h – 7h	10	0	18h – 19h	20	0
7h – 8h	20	0	19h – 20h	10	0
8h – 9h	50	0	20h – 21h	0	0
9h – 10h	90	0	21h – 22h	0	0
10h – 11h	100	0	22h – 23h	0	0
11h – 12h	100	0	23h – 24h	0	0

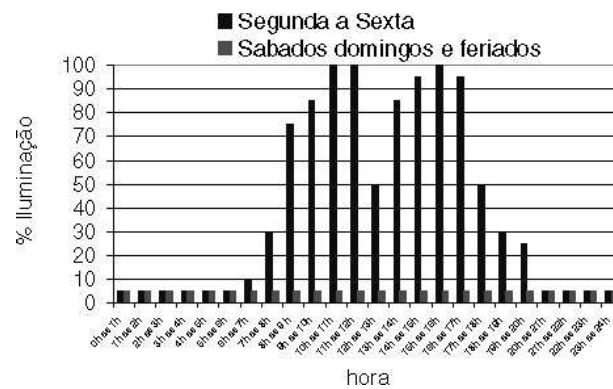


Figura C.2: Perfil de iluminação.

Quadro C.2: Perfil de iluminação.

horas	% de iluminação		horas	% de iluminação	
	Segunda a sexta	Fins de semana		Segunda a sexta	Fins de semana
0h – 1h	5	5	12h – 13h	50	5
1h – 2h	5	5	13h – 14h	85	5
2h – 3h	5	5	14h – 15h	95	5
3h – 4h	5	5	15h – 16h	100	5
4h – 5h	5	5	16h – 17h	95	5
5h – 6h	5	5	17h – 18h	50	5
6h – 7h	10	5	18h – 19h	30	5
7h – 8h	30	5	19h – 20h	25	5
8h – 9h	75	5	20h – 21h	5	5
9h – 10h	85	5	21h – 22h	5	5
10h – 11h	100	5	22h – 23h	5	5
11h – 12h	100	5	23h – 24h	5	5



Figura C.3: Perfil de equipamentos.

Quadro C.3: Perfil de equipamentos.

horas	% de equipamentos		horas	% de equipamentos	
	Segunda a sexta	Fins de semana		Segunda a sexta	Fins de semana
0h – 1h	15	15	12h – 13h	70	15
1h – 2h	15	15	13h – 14h	70	15
2h – 3h	15	15	14h – 15h	95	15
3h – 4h	15	15	15h – 16h	100	15
4h – 5h	15	15	16h – 17h	90	15
5h – 6h	15	15	17h – 18h	70	15
6h – 7h	30	15	18h – 19h	45	15
7h – 8h	70	15	19h – 20h	25	15
8h – 9h	85	15	20h – 21h	15	15
9h – 10h	95	15	21h – 22h	15	15
10h - 11h	100	15	22h – 23h	15	15
11h – 12h	95	15	23h – 24h	15	15



## Apêndice D

# Dimensionamento de sombreamentos

O método de dimensionamento de sombreamento estáticos assenta em dois pressupostos as coordenadas geográficas e os dados climáticos. A latitude e longitude são fundamentais pois definem a posição do sol esta influência nas dimensões adoptar, enquanto a temperatura ao longo do ano permite estimar quando é mais desejável o sombreamento.

### D.1 Caracterização do local

Para o caso de Portugal as orientações que o sombreamento necessita de responder são a Este, Sul e Oeste. Nas orientações Este e Oeste o sombreamento é praticamente simétrico logo só é necessário dimensionar duas orientações.

*Quadro D.1:* Localização do edifício, latitude, longitude, fuso horário e altitude.

Cidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Fuso horário GMT ( <i>h</i> )	Altitude ( <i>m</i> )
Lisboa	38,73°N	9,15°W	0	71

### D.2 Período de sombreamento

O primeiro passo para um bom sombreamento é identificar os períodos ao longo no ano que é benéfico ou indesejado ter radiação directa sobre o envidraçado. Portugal possui um clima quente sendo que exige um sombreamento eficaz na época de calor, em que os raios solares são mais intensos. Um dos métodos para limitar o período de sombreamento é a escolha dos dias de equinócio<sup>1</sup>, 21 de Março (equinócio da Primavera) e 23 de Setembro (equinócio de Outono). Esta regra de boa prática baseia-se em que os dias

<sup>1</sup>O equinócio é definido como um dos dois momentos em que o Sol, na sua órbita aparente (vista da Terra), cruza o plano do equador celeste (a linha do equador terrestre projectada na esfera celeste). É a época em que o dia e noite têm durações iguais.

de equinócio aproximam-se grosseiramente do período de aquecimento e arrefecimento (Sargent *et al.*, 2011).

O período do dia fixado para a optimização do sombreamento é entre as 10h00 da manhã e as 15h00 da tarde. É procurado o período do dia em que as temperaturas são mais elevadas e a radiação solar é mais intensa e por isso o espaço interior se encontra mais susceptível ao aquecimento se não tiver um sombreamento adequado nos vãos expostos.

Ao identificar o período ao longo do ano e do dia em que é necessário sombreamento é possível encontrar os pontos mais extremos dos elementos de sombra (Figura D.1).

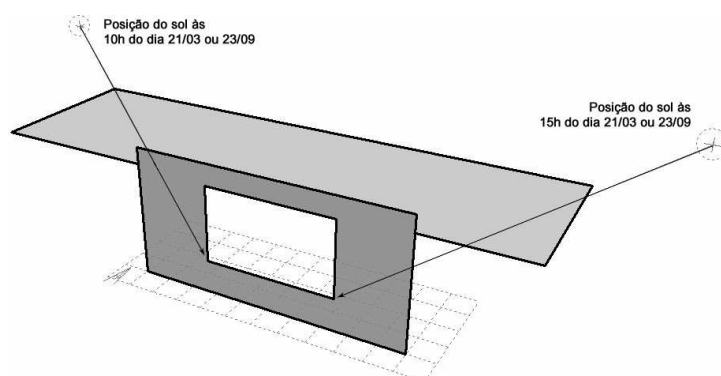


Figura D.1: Sombreamento horizontal simples baseado em dois momentos (manhã e tarde) (Adaptado de Marsh, 2003).

### D.3 Princípios da Geometria Solar

Definido os intervalos de dias e de horas é necessário obter as coordenadas solares através da leitura da carta solar<sup>2</sup> para a cidade de Lisboa.

Na carta solar estão representados o Azimute (A) variando de 0° a 360°, a altura solar (h) variando de 0° a 90°, as trajectórias solares aparentes de alguns dias do ano, ao longo do dia. As figuras seguintes representam cartas solares de Lisboa nos dias 21 de Março 10h (Figura D.2) e 15h (Figura D.3), dia 23 de Setembro às 10h (Figura D.4) e 15h (Figura D.5).

Quadro D.2: Valores das coordenadas solares para os dias 21 de Março e 23 de Setembro às 10h e às 15h.

Horas	Coordenadas Horizontais	21 Março	23 Setembro
10h	Azimute (A)	126	129,3
	Altura (h)	36	38,6
15h	Azimute (A)	-132,9	-128,7
	Altura (h)	40	38,2

<sup>2</sup>A projecção aparente do Sol no plano horizontal do lugar é designada por diagrama de trajectória solar. Quando as trajectórias são representadas para vários dias do ano, numa dada latitude, obtém-se uma carta solar.

#### D.4. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO

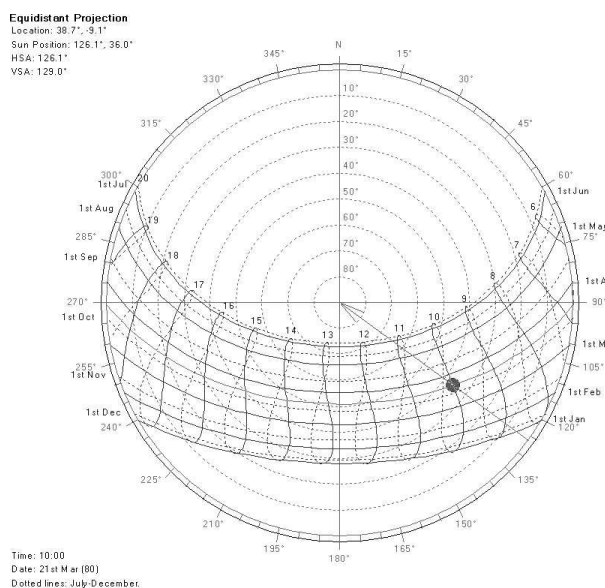


Figura D.2: Diagrama solar dia 21 de Março às 10h (Autodesk, s.d.).

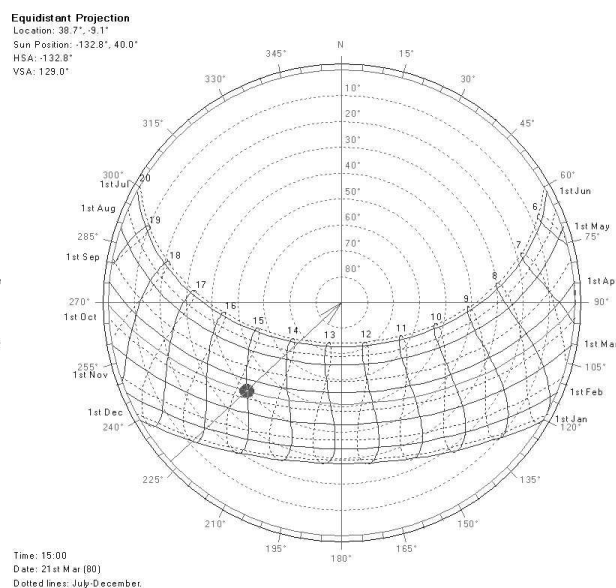


Figura D.3: Diagrama solar dia 21 de Março às 15h (Autodesk, s.d.).

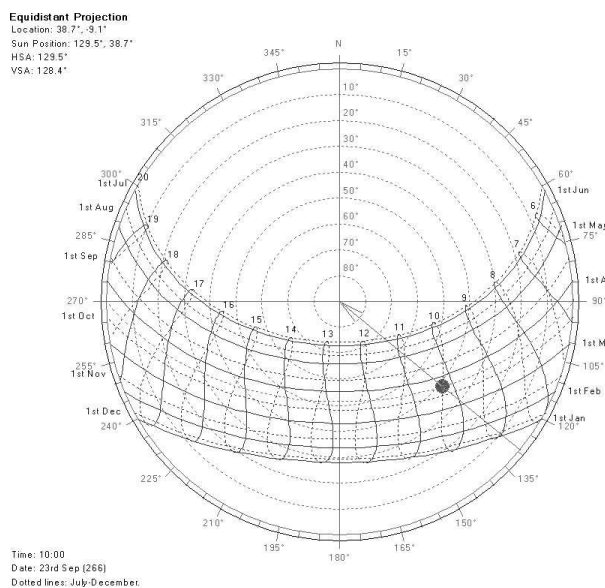


Figura D.4: Diagrama solar dia 23 de Setembro às 10h (Autodesk, s.d.).

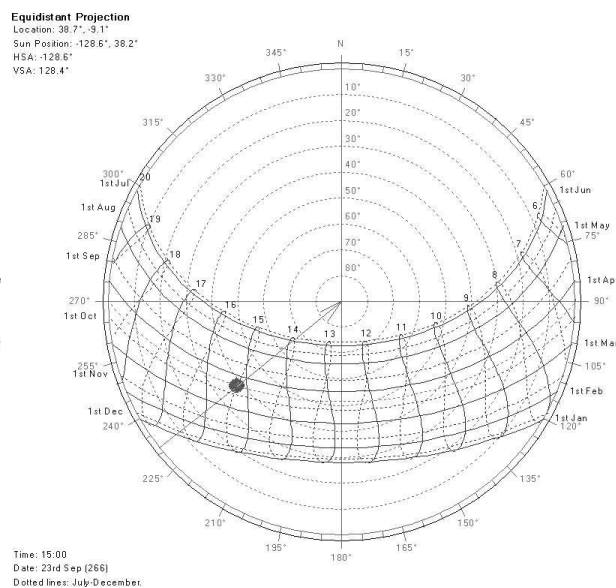


Figura D.5: Diagrama solar dia 23 de Setembro às 15h (Autodesk, s.d.).

### D.4 Dimensionamento dos elementos de sombreamento

Fixada a localização, a orientação e o período anual e diário de maior necessidade de sombreamento, com base nas características do clima local, pode-se passar a uma fase de concepção (Figura D.6)

Aplicando a Equação D.1 para elementos horizontais e Equação D.2 para verticais, obtêm-se uma geometria mínima como ponto de partida (Program, 1997).

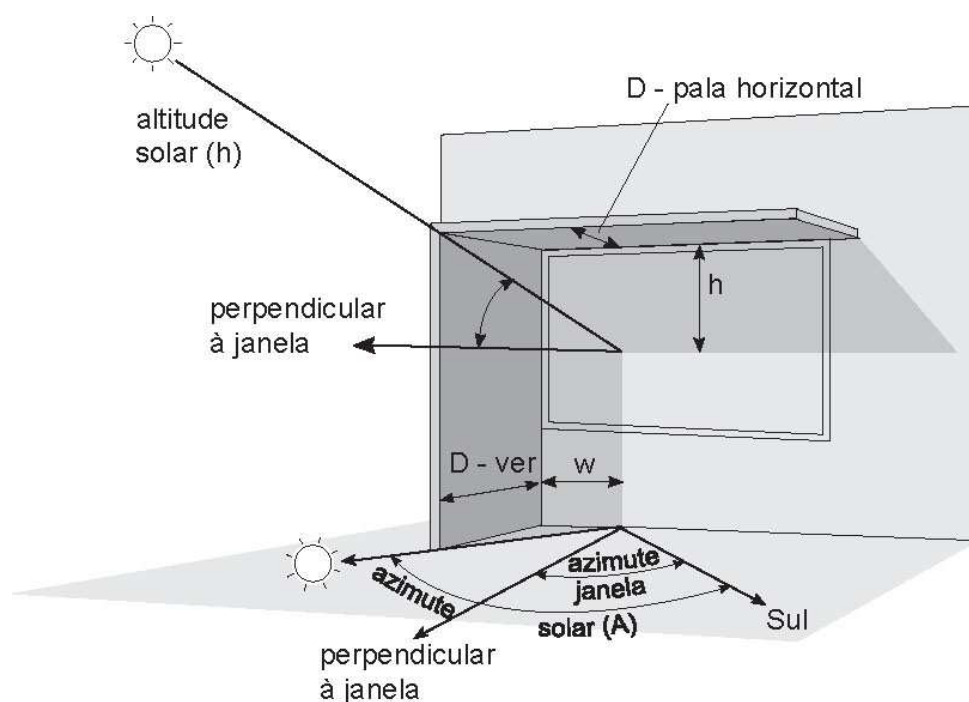


Figura D.6: Dimensionamento de sombreamentos (Adaptado de Program, 1997).

$$h_j = \frac{D * \tan(\text{altitudesolar})}{\cos(\text{azimutesolar} - \text{azimutejanela})} \ddagger \quad (\text{D.1})$$

- Para um sombreamento total o  $h_j$  toma o valor da altura da janela mais a altura até ao elemento.
- Para um sombreamento parcial o  $h_j$  pode tomar outro valor, geralmente adopta-se 2/3 da altura da janela como superfície sombreada.
- no caso da pala horizontal resultar numa largura ( $D$ ) elevada pode-se dividir em vários elementos mais pequenos distribuídos ao longo da janela, ou adicionar elementos verticais.

$$w = D * \tan(\text{azimutesolar} - \text{azimutejanela}) \ddagger \quad (\text{D.2})$$

‡ Verificar os sinais, isto se o azimute solar e o azimute da janela se encontrarem no mesmo lado do vector sul, então ambos são positivos. Se estiverem em lados opostos basta definir um como negativo ( $\text{azimute solar} - (-\text{azimute janela})$ )

Com a conjugação dos dois módulos horizontal e vertical é possível criar uma grelha ligeira capaz de proporcionar o mesmo sombreamento evitando as dimensões exageradas de palas horizontais. O método de cálculo para este tipo de protecção é a conjugação dos métodos indicados anteriormente para as palas horizontais e verticais. Por regra o dimensionamento das palas verticais fica condicionado pela largura dos elementos horizontais (Cunha, 2005).

Ao dispor do modelo em 3 dimensões no *Google Sketchup* é possível interactivamente manipular e

#### D.4. DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE SOMBREAMENTO

perceber a influência das diferentes variáveis sobre as dimensões dos elementos de sombreamento.

##### D.4.1 Dimensionamento das palas horizontais para a área de janela 30%

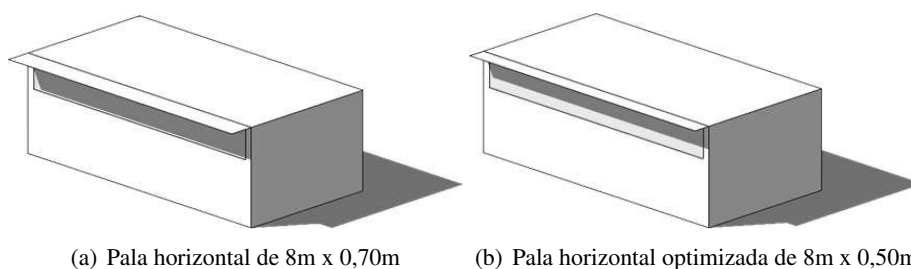
No Quadro D.3 são expressos os resultados de pré-dimensionamento das palas horizontais para a área de janela de 30%. A Figura D.7 representa o resultado do dimensionamento final para a pala horizontal no vão de janela de 30%.

Quadro D.3: Cálculo e otimização das palas horizontais para área de janela de 30%.

Período otimizado		Tipo de pala	Orientação Sul
21/03 a 23/09	$h_j^a$	horizontal	8m x 0,70m
	$h_{jopt}^b$	horizontal	8m x 0,50m

<sup>a</sup>  $h_j$  altura da janela + 0,07m

<sup>b</sup>  $h_{jopt}$  2/3 altura da janela + 0,07m



(a) Pala horizontal de 8m x 0,70m

(b) Pala horizontal otimizada de 8m x 0,50m

Figura D.7: Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para área de janela de 30% no dia 23/09 às 15h.

##### D.4.2 Dimensionamento das palas horizontais para a área de janela 60%

No Quadro D.4 são expressos os resultados de pré-dimensionamento das palas horizontais para a área de janela de 60%. A Figura D.8 representa o resultado do dimensionamento final para a pala horizontal no vão de janela de 60%.

Quadro D.4: Cálculo e otimização das palas horizontais para área de janela de 60%.

Período otimizado		Tipo de pala	Orientação Sul
21/03 a 23/09	$h_j^a$	horizontal	8m x 1,40m
	$h_{jopt}^b$	horizontal	8m x 1,00m

<sup>a</sup>  $h_j$  altura da janela + 0,07m

<sup>b</sup>  $h_{jopt}$  2/3 altura da janela + 0,07m

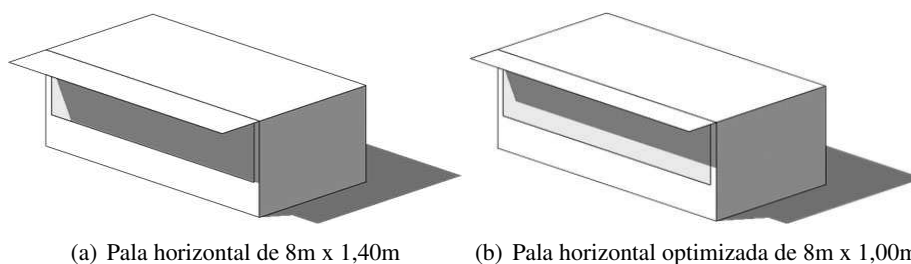


Figura D.8: Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para área de janela de 60% no dia 23/09 às 15h.

### D.4.3 Dimensionamento das palas horizontais para a área de janela 90%

No Quadro D.5 são expressos os resultados de pré-dimensionamento das palas horizontais para a área de janela de 90%. A Figura D.9 representa o resultado do dimensionamento final para a pala horizontal no vão de janela de 90%.

Quadro D.5: Cálculo e otimização das palas horizontais para área de janela de 90%.

Período otimizado		Tipo de pala	Orientação Sul
21/03 a 23/09	$h_j^a$	horizontal	8m x 2,10m
	$h_{jopt}^b$	horizontal	8m x 1,40m

<sup>a</sup>  $h_j$  altura da janela + 0,07m

<sup>b</sup>  $h_{jopt}$  2/3 altura da janela + 0,07m

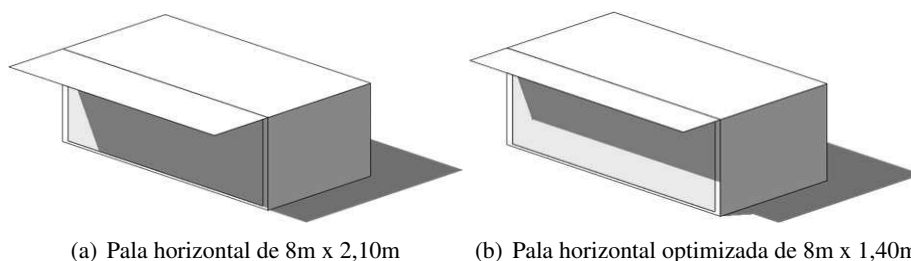


Figura D.9: Modelo de 3 dimensões das palas horizontais para área de janela de 90% no dia 23/09 às 15h.

## D.5 Conclusões do dimensionamento de sombreamentos

No seguimento do estudo, para a avaliação da distribuição da iluminação natural com os sombreamentos dimensionados anteriormente, é utilizado o modelo orientado para sul, porque considera-se que os elementos de sombreamento resultam em proporções mais adequadas nesta orientação. Na orientação Este ou Oeste os elementos de sombreamento, devido às características da localização geográfica, resultam em elementos verticais muito extensos. Deste modo só é analisado os elementos horizontais dimensionados para a orientação Sul em todos os modelos e orientações (Norte, Sul, Este e Oeste).

## Apêndice E

# Relação entre a percentagem de área e DA e o DAmax

Quadro E.1: Valores de DA e DAmax obtidos com o escritório M1 para abertura de janela 30%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAmax ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAmax)	40 - 60% DA (1 - 3% DAmax)	60 - 80% DA (3 - 5% DAmax)	80 - 100% DA (5 - 100% DAmax)
V1N	DA	100	0	0	0
	DAmax	100	0	0	0
V2N	DA	0	0	13	86
	DAmax	100	0	0	0
V2PhN	DA	0	1	44	55
	DAmax	100	0	0	0
V1S	DA	100	0	0	0
	DAmax	70	23	7	0
V2S	DA	0	0	0	100
	DAmax	0	0	0	100
V2PhS	DA	0	0	7	93
	DAmax	14	7	8	70
V1E	DA	100	0	0	0
	DAmax	86	14	0	0
V2E	DA	0	0	0	99
	DAmax	0	1	1	98
V2PhE	DA	0	0	11	89
	DAmax	5	7	7	80
V1O	DA	100	0	0	0
	DAmax	80	20	0	0
V2O	DA	0	0	2	98
	DAmax	3	7	13	78
V2PhO	DA	0	0	17	82
	DAmax	11	20	31	38

APÊNDICE E. RELAÇÃO ENTRE A PERCENTAGEM DE ÁREA E DA E O DAMAX

Quadro E.2: Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M1 para abertura de janela 60%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAmáx ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAmáx)	40 - 60% DA (1 - 3% DAmáx)	60 - 80% DA (3 - 5% DAmáx)	80 - 100% DA (5 - 100% DAmáx)
V1N	DA	96	4	0	0
	DAmáx	100	0	0	0
V2N	DA	0	0	0	100
	DAmáx	58	6	4	33
V2PhN	DA	0	0	0	100
	DAmáx	75	8	5	13
V1S	DA	43	18	22	17
	DAmáx	48	8	7	37
V2S	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	0	0	100
V2PhS	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	7	11	81
V1E	DA	52	32	16	0
	DAmáx	44	16	11	29
V2E	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	0	0	100
V2PhE	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	0	0	100
V1O	DA	69	31	0	0
	DAmáx	57	14	10	19
V2O	DA	0	0	0	100
	DAmáx	1	3	2	94
V2PhO	DA	0	0	0	100
	DAmáx	4	7	16	73

Quadro E.3: Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M1 para abertura de janela 90%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAmáx ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAmáx)	40 - 60% DA (1 - 3% DAmáx)	60 - 80% DA (3 - 5% DAmáx)	80 - 100% DA (5 - 100% DAmáx)
V1N	DA	80	19	1	0
	DAmáx	100	0	0	0
V2N	DA	0	0	0	100
	DAmáx	54	6	3	37
V2PhN	DA	0	0	0	100
	DAmáx	76	6	3	15
V1S	DA	31	23	27	21
	DAmáx	44	10	8	38
V2S	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	0	0	100
V2PhS	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	4	9	87
V1E	DA	43	32	25	0
	DAmáx	40	19	11	31
V2E	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	0	0	100
V2PhE	DA	0	0	0	100
	DAmáx	0	0	0	100
V1O	DA	62	20	17	0
	DAmáx	51	18	10	21
V2O	DA	0	0	0	100
	DAmáx	4	3	4	89
V2PhO	DA	0	0	0	100
	DAmáx	5	9	15	72

APÊNDICE E. RELAÇÃO ENTRE A PERCENTAGEM DE ÁREA E DA E O DAMAX

Quadro E.4: Valores de DA e DAMax obtidos com o escritório M2 para abertura de janela 30%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAMax ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAMax)	40 - 60% DA (1 - 3% DAMax)	60 - 80% DA (3 - 5% DAMax)	80 - 100% DA (5 - 100% DAMax)
V1N	DA	100	0	0	0
	DAMax	100	0	0	0
V2N	DA	47	5	16	30
	DAMax	100	0	0	0
V2PhN	DA	51	8	25	15
	DAMax	100	0	0	0
V1S	DA	100	0	0	0
	DAMax	86	11	3	0
V2S	DA	27	10	14	48
	DAMax	46	4	3	47
V2PhS	DA	38	6	17	39
	DAMax	58	6	4	32
V1E	DA	100	0	0	0
	DAMax	98	2	0	0
V2E	DA	31	14	13	41
	DAMax	22	9	13	56
V2PhE	DA	39	11	21	30
	DAMax	31	14	12	43
V1O	DA	100	0	0	0
	DAMax	91	9	0	0
V2O	DA	41	8	13	38
	DAMax	46	12	7	35
V2PhO	DA	45	9	20	25
	DAMax	52	17	14	17

Quadro E.5: Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M2 para abertura de janela 60%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAmáx ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAmáx)	40 - 60% DA (1 - 3% DAmáx)	60 - 80% DA (3 - 5% DAmáx)	80 - 100% DA (5 - 100% DAmáx)
V1N	DA	100	0	0	0
	DAmáx	100	0	0	0
V2N	DA	8	21	20	50
	DAmáx	81	3	2	14
V2PhN	DA	23	14	21	42
	DAmáx	88	5	3	4
V1S	DA	76	8	10	7
	DAmáx	76	4	3	16
V2S	DA	0	0	29	71
	DAmáx	41	7	3	48
V2PhS	DA	0	6	32	63
	DAmáx	49	12	3	36
V1E	DA	81	16	3	0
	DAmáx	74	8	6	13
V2E	DA	0	4	33	64
	DAmáx	6	20	7	67
V2PhE	DA	0	13	31	56
	DAmáx	15	24	6	55
V1O	DA	88	13	0	0
	DAmáx	80	8	5	8
V2O	DA	0	20	21	58
	DAmáx	46	7	7	40
V2PhO	DA	3	25	20	51
	DAmáx	51	11	8	29

APÊNDICE E. RELAÇÃO ENTRE A PERCENTAGEM DE ÁREA E DA E O DAMAX

Quadro E.6: Valores de DA e DAMax obtidos com o escritório M2 para abertura de janela 90%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAMax ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAMax)	40 - 60% DA (1 - 3% DAMax)	60 - 80% DA (3 - 5% DAMax)	80 - 100% DA (5 - 100% DAMax)
V1N	DA	92	7	0	0
	DAMax	100	0	0	0
V2N	DA	0	4	39	57
	DAMax	80	3	2	16
V2PhN	DA	0	23	30	47
	DAMax	90	3	1	6
V1S	DA	73	8	11	9
	DAMax	76	4	3	17
V2S	DA	0	0	9	92
	DAMax	39	9	3	49
V2PhS	DA	0	0	29	71
	DAMax	50	13	3	33
V1E	DA	77	13	10	0
	DAMax	74	7	5	14
V2E	DA	0	0	25	75
	DAMax	5	19	8	69
V2PhE	DA	0	0	36	63
	DAMax	12	28	8	51
V1O	DA	85	9	6	0
	DAMax	79	6	5	9
V2O	DA	0	0	32	68
	DAMax	42	11	5	42
V2PhO	DA	0	3	40	58
	DAMax	53	11	6	29

Quadro E.7: Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M3 para abertura de janela 30%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAmáx ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAmáx)	40 - 60% DA (1 - 3% DAmáx)	60 - 80% DA (3 - 5% DAmáx)	80 - 100% DA (5 - 100% DAmáx)
V1N	DA	100	0	0	0
	DAmáx	100	0	0	0
V2N	DA	75	3	7	14
	DAmáx	100	0	0	0
V2PhN	DA	77	3	12	8
	DAmáx	100	0	0	0
V1S	DA	100	0	0	0
	DAmáx	93	6	1	0
V2S	DA	68	4	6	23
	DAmáx	74	2	1	23
V2PhS	DA	71	4	7	19
	DAmáx	79	4	2	15
V1E	DA	100	0	0	0
	DAmáx	99	1	0	0
V2E	DA	69	6	6	19
	DAmáx	63	4	7	25
V2PhE	DA	72	5	9	14
	DAmáx	66	7	6	20
V1O	DA	99	0	0	0
	DAmáx	96	4	0	0
V2O	DA	72	4	6	18
	DAmáx	75	5	3	17
V2PhO	DA	75	3	9	12
	DAmáx	77	8	7	8

APÊNDICE E. RELAÇÃO ENTRE A PERCENTAGEM DE ÁREA E DA E O DAMAX

Quadro E.8: Valores de DA e DAMax obtidos com o escritório M3 para abertura de janela 60%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAMax ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAMax)	40 - 60% DA (1 - 3% DAMax)	60 - 80% DA (3 - 5% DAMax)	80 - 100% DA (5 - 100% DAMax)
V1N	DA	100	0	0	0
	DAMax	100	0	0	0
V2N	DA	64	4	8	23
	DAMax	91	1	1	7
V2PhN	DA	67	4	8	20
	DAMax	94	2	1	2
V1S	DA	88	4	5	3
	DAMax	88	2	2	8
V2S	DA	56	6	7	32
	DAMax	72	3	1	23
V2PhS	DA	59	4	7	29
	DAMax	75	6	1	18
V1E	DA	91	7	2	0
	DAMax	87	4	3	6
V2E	DA	57	7	8	29
	DAMax	59	7	3	32
V2PhE	DA	60	6	9	26
	DAMax	64	8	3	26
V1O	DA	94	6	0	0
	DAMax	90	4	2	4
V2O	DA	61	4	7	27
	DAMax	73	5	3	19
V2PhO	DA	64	4	8	24
	DAMax	76	5	4	14

Quadro E.9: Valores de DA e DAmáx obtidos com o escritório M3 para abertura de janela 90%, nas quatro orientações principais.

Casos	Métrica	% de área DA e DAmáx ( $m^2$ )			
		0 - 40% DA (0 - 1% DAmáx)	40 - 60% DA (1 - 3% DAmáx)	60 - 80% DA (3 - 5% DAmáx)	80 - 100% DA (5 - 100% DAmáx)
V1N	DA	95	4	0	0
	DAmáx	100	0	0	0
V2N	DA	58	5	10	27
	DAmáx	90	1	1	8
V2PhN	DA	61	6	11	22
	DAmáx	95	1	1	3
V1S	DA	86	4	5	4
	DAmáx	88	2	2	8
V2S	DA	49	6	9	36
	DAmáx	71	4	1	24
V2PhS	DA	53	6	10	31
	DAmáx	76	6	2	16
V1E	DA	89	6	5	0
	DAmáx	87	4	2	7
V2E	DA	50	8	9	33
	DAmáx	57	8	3	32
V2PhE	DA	55	7	11	28
	DAmáx	64	8	4	24
V1O	DA	92	4	3	0
	DAmáx	90	3	2	5
V2O	DA	55	6	9	30
	DAmáx	72	5	3	20
V2PhO	DA	58	6	10	26
	DAmáx	77	6	3	14



## Apêndice F

### Consumos de energia eléctrica

Os consumos estimados de energia eléctrica obtidos com os modelos base nas quatro orientações principais encontram-se no Quadro F.1, Modelo 1 no Quadro F.2, Modelo 2 no Quadro F.3 e Modelo 3 no Quadro F.4.

*Quadro F.1:* Consumo estimado de energia eléctrica obtido com os escritórios MB1, MB2 e MB3, nas quatro orientações principais.

		Consumo de electricidade ( $KWh/m^2.ano$ )								
Orientação	Tipo consumo	MB1			MB2			MB3		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	18,8			18,8			18,8		
	Equipamentos	52,6			52,6			52,6		
	Ventilação	4,5			3,8			3,8		
	Ar-condicionado	17,9			15,3			16		
	<b>Total</b>	<b>93,8</b>			<b>90,5</b>			<b>91,2</b>		
Sul	Iluminação artificial	18,8			18,8			18,8		
	Equipamentos	52,6			52,6			52,6		
	Ventilação	17,1			11,3			8		
	Ar-condicionado	54,3			38,4			29,2		
	<b>Total</b>	<b>142,8</b>			<b>121,1</b>			<b>108,6</b>		
Este	Iluminação artificial	18,8			18,8			18,8		
	Equipamentos	52,6			52,6			52,6		
	Ventilação	12,7			9,3			7,2		
	Ar-condicionado	38,6			29,8			24,4		
	<b>Total</b>	<b>122,7</b>			<b>110,5</b>			<b>103</b>		
Oeste	Iluminação artificial	18,8			18,8			18,8		
	Equipamentos	52,6			52,6			52,6		
	Ventilação	16,9			11,1			7,9		
	Ar-condicionado	51,3			35,4			26,4		
	<b>Total</b>	<b>139,6</b>			<b>117,9</b>			<b>105,7</b>		

APÊNDICE F. CONSUMOS DE ENERGIA ELÉCTRICA

Quadro F.2: Consumo estimado de energia eléctrica obtido com o escritório M1 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

		Consumo de electricidade (KWh/m <sup>2</sup> .ano)								
Orientação	Tipo consumo	A <sub>j</sub> 30			A <sub>j</sub> 60			A <sub>j</sub> 90		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	13,6	5,2	6,4	11,4	3,9	4,1	10,6	3,8	4
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	2,1	2,6	2,5	2	3,3	3	2,2	4	3,7
	Ar-condicionado	9,6	11,6	11,1	9,8	14	13,1	12,4	17,3	16,2
	<b>Total</b>	<b>77,9</b>	<b>72</b>	<b>72,6</b>	<b>75,8</b>	<b>73,8</b>	<b>72,8</b>	<b>77,8</b>	<b>77,7</b>	<b>76,5</b>
Sul	Iluminação artificial	12,8	4,6	5,4	10,2	3,8	3,9	9,3	3,7	3,8
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,8	8,1	4,5	5,8	12,5	5,6	6,9	16,3	7,1
	Ar-condicionado	18,3	29	17,9	20,7	41,3	21,1	23,6	51,8	25,3
	<b>Total</b>	<b>88,5</b>	<b>94,3</b>	<b>80,4</b>	<b>89,3</b>	<b>110,2</b>	<b>83,2</b>	<b>92,4</b>	<b>124,4</b>	<b>88,8</b>
Este	Iluminação artificial	12,7	4,6	5,3	9,5	3,8	3,9	8,5	3,7	3,8
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,1	6,6	4,8	4,6	9,5	6	4,6	11,9	7,4
	Ar-condicionado	14,8	22,2	16,7	15,8	30	19,6	15,6	36,4	23,4
	<b>Total</b>	<b>84,2</b>	<b>86</b>	<b>79,4</b>	<b>82,5</b>	<b>95,9</b>	<b>82,1</b>	<b>81,3</b>	<b>104,6</b>	<b>87,2</b>
Oeste	Iluminação artificial	13,4	4,8	5,8	10,6	3,8	4	9,6	3,2	3,8
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	5,2	7,7	5,9	6,2	12,1	8,2	7,3	16	10,8
	Ar-condicionado	16,8	26	19,6	19,5	38,1	25,8	22,6	48,8	32,8
	<b>Total</b>	<b>88</b>	<b>91,1</b>	<b>83,9</b>	<b>88,9</b>	<b>106,6</b>	<b>90,6</b>	<b>92,1</b>	<b>120,6</b>	<b>100</b>

Quadro F.3: Consumo estimado de energia eléctrica obtido com o escritório M2 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

		Consumo de electricidade ( $KWh/m^2.ano$ )								
Orientação	Tipo consumo	$A_j30$			$A_j60$			$A_j90$		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	14,5	11,3	11,5	14	6,6	7,2	13,5	5,5	5,9
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	2,8	3,1	3	2,4	3	2,8	2,3	3,1	2,9
	Ar-condicionado	12,5	13,3	13	11,1	12,5	12	10,2	13,2	12,5
	<b>Total</b>	<b>82,4</b>	<b>80,3</b>	<b>80,1</b>	<b>80,1</b>	<b>74,7</b>	<b>74,6</b>	<b>78,6</b>	<b>74,4</b>	<b>73,9</b>
Sul	Iluminação artificial	14,2	8,8	9,6	13,4	5,2	5,7	13	4,6	4,9
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,3	5,9	4,1	4,9	8,1	4,5	5,4	10,4	5,3
	Ar-condicionado	17,8	23,2	17,1	18,9	29,5	18,2	20,1	35,8	20,6
	<b>Total</b>	<b>88,9</b>	<b>90,5</b>	<b>83,4</b>	<b>89,8</b>	<b>95,4</b>	<b>81</b>	<b>91,1</b>	<b>103,4</b>	<b>83,4</b>
Este	Iluminação artificial	14,2	9	9,4	13,2	5,5	5,9	12,7	4,8	5,1
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,1	5,3	4,3	4,4	7	5	4,6	8,5	5,8
	Ar-condicionado	15,8	19,5	16,3	15,8	23,5	17,4	16,2	27,4	19,4
	<b>Total</b>	<b>86,7</b>	<b>86,4</b>	<b>82,6</b>	<b>86</b>	<b>88,6</b>	<b>80,9</b>	<b>86,1</b>	<b>93,3</b>	<b>82,9</b>
Oeste	Iluminação artificial	14,4	9,9	10,3	13,6	6	6,3	13,2	5	5,3
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,7	5,8	4,9	5,3	8	6	5,8	10,2	7,3
	Ar-condicionado	15,5	21,1	16,8	17,1	26,7	19,8	18,7	32,8	23,6
	<b>Total</b>	<b>87,2</b>	<b>89,4</b>	<b>84,6</b>	<b>88,6</b>	<b>93,3</b>	<b>84,7</b>	<b>90,3</b>	<b>100,6</b>	<b>88,8</b>

APÊNDICE F. CONSUMOS DE ENERGIA ELÉCTRICA

Quadro F.4: Consumo estimado de energia eléctrica obtido com o escritório M3 para área de janela variável, nas quatro orientações principais.

		Consumo de electricidade ( $KWh/m^2.ano$ )								
Orientação	Tipo consumo	$A_j30$			$A_j60$			$A_j90$		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	15	14,6	14,6	14,9	13,9	14	14,8	13,2	13,3
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	3,3	3,5	3,4	3,1	3,4	3,4	2,9	3,5	3,4
	Ar-condicionado	14,3	15	14,9	13,6	14,7	14,4	12,9	14,5	14,1
	<b>Total</b>	<b>85,2</b>	<b>85,7</b>	<b>85,5</b>	<b>84,2</b>	<b>84,6</b>	<b>84,4</b>	<b>83,2</b>	<b>83,8</b>	<b>83,4</b>
Sul	Iluminação artificial	15	14,2	14,3	14,8	13,3	13,5	14,7	12,5	12,8
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,1	4,9	4	4,4	6,2	4,4	4,7	7,5	4,8
	Ar-condicionado	17,6	20,8	17,1	18,3	24,4	18	18,9	27,9	19,2
	<b>Total</b>	<b>89,3</b>	<b>92,5</b>	<b>88</b>	<b>90,1</b>	<b>96,5</b>	<b>88,5</b>	<b>90,9</b>	<b>100,5</b>	<b>89,4</b>
Este	Iluminação artificial	14,9	14,1	14,1	14,8	13	13,2	14,6	12,1	12,4
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,1	4,7	4,2	4,3	5,7	4,6	4,5	6,6	5,2
	Ar-condicionado	16,5	18,5	16,9	16,6	20,9	17,5	16,6	23,1	18,5
	<b>Total</b>	<b>88,1</b>	<b>89,9</b>	<b>87,8</b>	<b>88,3</b>	<b>92,2</b>	<b>87,9</b>	<b>88,3</b>	<b>94,4</b>	<b>88,7</b>
Oeste	Iluminação artificial	15	14,4	14,4	14,9	13,6	13,7	14,8	12,8	13
	Equipamentos	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6	52,6
	Ventilação	4,3	4,9	4,5	4,7	6,1	5,1	5	7,3	5,9
	Ar-condicionado	14,9	18,8	15,5	15,8	22,1	17,2	16,8	25,4	19,4
	<b>Total</b>	<b>86,8</b>	<b>90,7</b>	<b>87</b>	<b>88</b>	<b>94,4</b>	<b>88,6</b>	<b>89,2</b>	<b>98,1</b>	<b>90,9</b>

## Apêndice G

# Redução de consumos entre os modelos paramétricos e o modelo base

As reduções de consumo de energia eléctrica do Modelo 1 para as três aberturas de janela encontram-se no Quadro G.1, Modelo 2 no Quadro G.2 e Modelo 3 no Quadro G.3.

*Quadro G.1:* Redução de consumo entre Modelo 1 e o Modelo base 1 nas orientações Norte, Sul, Este e Oeste.

		Consumo de electricidade ( $KWh/m^2.ano$ )								
Orientação	Tipo consumo	$A_{j30}$			$A_{j60}$			$A_{j90}$		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	27,7	72,3	66	39,4	79,3	78,2	43,6	79,8	78,7
	Ventilação	53,3	42,2	44,4	55,6	26,7	33,3	51,1	11,1	17,8
	Ar-condicionado	46,4	35,2	38	45,3	21,8	26,8	30,7	3,4	9,5
	<b>Total</b>	<b>38,6</b>	<b>52,9</b>	<b>51,5</b>	<b>43,7</b>	<b>48,5</b>	<b>51</b>	<b>38,8</b>	<b>39,1</b>	<b>42</b>
Sul	Iluminação artificial	31,9	75,5	71,3	45,7	79,8	79,3	50,5	80,3	79,8
	Ventilação	71,9	52,6	73,7	66,1	26,9	67,3	59,6	4,7	58,5
	Ar-condicionado	66,3	46,6	67	61,9	23,9	61,1	56,5	4,6	53,4
	<b>Total</b>	<b>60,2</b>	<b>53,8</b>	<b>69,2</b>	<b>59,3</b>	<b>36,1</b>	<b>66,1</b>	<b>55,9</b>	<b>20,4</b>	<b>59,9</b>
Este	Iluminação artificial	32,4	75,5	71,8	49,5	79,8	79,3	54,8	80,3	79,8
	Ventilação	67,7	48	62,2	63,8	25,2	52,8	63,8	6,3	41,7
	Ar-condicionado	61,7	42,5	56,7	59,1	22,3	49,2	59,6	5,7	39,4
	<b>Total</b>	<b>54,9</b>	<b>52,4</b>	<b>61,8</b>	<b>57,3</b>	<b>38,2</b>	<b>57,9</b>	<b>59,1</b>	<b>25,8</b>	<b>50,6</b>
Oeste	Iluminação artificial	28,7	74,5	69,1	43,6	79,8	78,7	48,9	83	79,8
	Ventilação	69,2	54,4	65,1	63,3	28,4	51,5	56,8	5,3	36,1
	Ar-condicionado	67,3	49,3	61,8	62	25,7	49,7	55,9	4,9	36,1
	<b>Total</b>	<b>59,3</b>	<b>55,7</b>	<b>64</b>	<b>58,3</b>	<b>37,9</b>	<b>56,3</b>	<b>54,6</b>	<b>21,8</b>	<b>45,5</b>

*APÊNDICE G. REDUÇÃO DE CONSUMOS ENTRE OS MODELOS PARAMÉTRICOS E O MODELO BASE*

*Quadro G.2: Redução de consumo entre Modelo 2 e o Modelo base 2 nas orientações Norte, Sul, Este e Oeste.*

		Consumo de electricidade ( <i>KWh/m<sup>2</sup>.ano</i> )								
Orientação	Tipo consumo	<i>A<sub>j</sub>30</i>			<i>A<sub>j</sub>60</i>			<i>A<sub>j</sub>90</i>		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	22,9	39,9	38,8	25,5	64,9	61,7	28,2	70,7	68,6
	Ventilação	26,3	18,4	21,1	36,8	21,1	26,3	39,5	18,4	23,7
	Ar-condicionado	18,3	13,1	15	27,5	18,3	21,6	33,3	13,7	18,3
	<b>Total</b>	<b>21,4</b>	<b>26,9</b>	<b>27,4</b>	<b>27,4</b>	<b>41,7</b>	<b>42</b>	<b>31,4</b>	<b>42,5</b>	<b>43,8</b>
Sul	Iluminação artificial	24,5	53,2	48,9	28,7	72,3	69,7	30,9	75,5	73,9
	Ventilação	61,9	47,8	63,7	56,6	28,3	60,2	52,2	8	53,1
	Ar-condicionado	53,6	39,6	55,5	50,8	23,2	52,6	47,7	6,8	46,4
	<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>44,7</b>	<b>55</b>	<b>45,7</b>	<b>37,5</b>	<b>58,5</b>	<b>43,8</b>	<b>25,8</b>	<b>55</b>
Este	Iluminação artificial	24,5	52,1	50	29,8	70,7	68,6	32,4	74,5	72,9
	Ventilação	55,9	43	53,8	52,7	24,7	46,2	50,5	8,6	37,6
	Ar-condicionado	47	34,6	45,3	47	21,1	41,6	45,6	8,1	34,9
	<b>Total</b>	<b>41,1</b>	<b>41,6</b>	<b>48,2</b>	<b>42,3</b>	<b>37,8</b>	<b>51,1</b>	<b>42,1</b>	<b>29,7</b>	<b>47,7</b>
Oeste	Iluminação artificial	23,4	47,3	45,2	27,7	68,1	66,5	29,8	73,4	71,8
	Ventilação	57,7	47,7	55,9	52,3	27,9	45,9	47,7	8,1	34,2
	Ar-condicionado	56,2	40,4	52,5	51,7	24,6	44,1	47,2	7,3	33,3
	<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>43,6</b>	<b>51</b>	<b>44,9</b>	<b>37,7</b>	<b>50,8</b>	<b>42,3</b>	<b>26,5</b>	<b>44,6</b>

*Quadro G.3: Redução de consumo entre Modelo 3 e o Modelo base 3 nas orientações Norte, Sul, Este e Oeste.*

		Consumo de electricidade ( <i>KWh/m<sup>2</sup>.ano</i> )								
Orientação	Tipo consumo	<i>A<sub>j</sub>30</i>			<i>A<sub>j</sub>60</i>			<i>A<sub>j</sub>90</i>		
		V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph	V1	V2	V2Ph
Norte	Iluminação artificial	20,2	22,3	22,3	20,7	26,1	25,5	21,3	29,8	29,3
	Ventilação	13,2	7,9	10,5	18,4	10,5	10,5	23,7	7,9	10,5
	Ar-condicionado	10,6	6,3	6,9	15	8,1	10	19,4	9,4	11,9
	<b>Total</b>	<b>15,5</b>	<b>14,2</b>	<b>14,8</b>	<b>18,1</b>	<b>17,1</b>	<b>17,6</b>	<b>20,7</b>	<b>19,2</b>	<b>20,2</b>
Sul	Iluminação artificial	20,2	24,5	23,9	21,3	29,3	28,2	21,8	33,5	31,9
	Ventilação	48,8	38,8	50	45	22,5	45	41,3	6,3	40
	Ar-condicionado	39,7	28,8	41,4	37,3	16,4	38,4	35,3	4,5	34,2
	<b>Total</b>	<b>34,5</b>	<b>28,8</b>	<b>36,8</b>	<b>33</b>	<b>21,6</b>	<b>35,9</b>	<b>31,6</b>	<b>14,5</b>	<b>34,3</b>
Este	Iluminação artificial	20,7	25	25	21,3	30,9	29,8	22,3	35,6	34
	Ventilação	43,1	34,7	41,7	40,3	20,8	36,1	37,5	8,3	27,8
	Ar-condicionado	32,4	24,2	30,7	32	14,3	28,3	32	5,3	24,2
	<b>Total</b>	<b>29,6</b>	<b>26</b>	<b>30,2</b>	<b>29,2</b>	<b>21,4</b>	<b>30</b>	<b>29,2</b>	<b>17,1</b>	<b>28,4</b>
Oeste	Iluminação artificial	20,2	23,4	23,4	20,7	27,7	27,1	21,3	31,9	30,9
	Ventilação	45,6	38	43	40,5	22,8	35,4	36,7	7,6	25,3
	Ar-condicionado	43,6	28,8	41,3	40,2	16,3	34,8	36,4	3,8	26,5
	<b>Total</b>	<b>35,6</b>	<b>28,2</b>	<b>35,2</b>	<b>33,3</b>	<b>21,3</b>	<b>32,2</b>	<b>31,1</b>	<b>14,3</b>	<b>27,9</b>